کارگاه جوشکاری و ورق‌کاری

مسعود فکوری حسن‌آبادی

بسم الله الرّحمن الرّحيم

کارگاه جوشکاری و ورق‌کاری

مسعود فکوری حسن‌آبادی

سرشناسه	:	فکوری حسن‌آبادی، مسعود، ۱۳۶۸-
عنوان و نام پدیدآور	:	کارگاه جوشکاری و ورق‌کاری/ مسعود فکوری‌حسن‌آبادی.
مشخصات نشر	:	تهران: پارسیان کتاب، ۱۳۹۸.
مشخصات ظاهری	:	۱۲۰ ص.: مصور، جدول ، نمودار.
شابک	:	978-622-6324-26-7
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا
موضوع	:	جوشکاری
موضوع	:	Welding
موضوع	:	ورقکاری
موضوع	:	Sheet-metal work
رده بندی کنگره	:	TS۲۲۷/۸
رده بندی دیویی	:	٦٧١/٥٢
شماره کتابشناسی ملی	:	٥٧٩١٢٣٣

تهران ، خیابان انقـلاب ، مقابل دانشگاه تهران ، مجتمع فرهنگی فروزنده ، طبقه سوم
واحد ۶۰۱ ، انتشارات پارسیان کتاب تلفن : ۶۶۹۶۲۶۵۷-۰۲۱

کارگاه جوشکاری و ورق‌کاری

تالیف: مسعود فکوری حسن‌آبادی
ناشر: انتشارات پارسیان کتاب
مدیر مسئول: سعید عابدینی
ناظر فنی: سعید عابدینی
نوبت چاپ: اول
شمارگان: ۵۰۰
قیمت: ۸۵۰۰۰ تومان
شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۶۳۲-۴۲-۶۷

ویرایش اول، سال ۱۳۹۹

www.parsianpub.com

تقدیم به

پدرم،

مادرم

و همسرم.

فهرست مطالب

فصل ۱. فلزات و فرآیندهای تولید قطعات فلزی ۱

۱-۱. خواص مکانیکی سازه‌های فلزی ۱

۱-۲. فرآیندهای تولید سازه‌های فلزی ٤

۱-۳. فلزات پرکاربرد در سازه‌ها ۸

۱-۳-۱. آلیاژهای آهنی ۸

۱-۳-۲. فلزات رنگین ۱۱

۱-٤. نمونه سؤال ۱۳

فصل ۲. ورق‌کاری ۱۵

۲-۱. گسترش ۱۵

۲-۲. برشکاری و سوراخ‌کاری ۲۰

۲-۳. صافکاری ۲۱

۲-٤. شکل‌دهی ۲۲

۲-۵. سوار کردن و اتصال ۲۵

۲-٦. نکات ایمنی ۲٦

۲-۷. نمونه سؤال ۲۷

فصل ۳. جوشکاری ۲۹

۳-۱. طرح اتصال ۳۲

۳-۲. هندسه جوش ۳۵

۳-۳. وضعیت جوشکاری ۳۹

۳-٤. روش جوشکاری ٤٠
۳-٥. جوشکاری قوسی با الکترود پوشش‌دار (SMAW) ٤۳
۳-٥-۱. قوس الکتریکی ٤٤
۳-٥-۲. منبع قدرت ٤۹
۳-٥-۳. الکترود ٥۳
۳-٥-٤. اثر پارامترهای فرآیند ٥٥
۳-٦. جوشکاری اکسی‌استیلن (OAW) ٥۷
۳-۷. جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW) ٦۲
۳-۸. عیوب در جوش ٦٥
۳-۸-۱. لکه قوس ٦۷
۳-۸-۲. پاشش ٦۷
۳-۸-۳. آخال‌های محبوس‌شده ٦۸
۳-۸-٤. تخلخل ٦۸
۳-۸-٥. سوختگی کنار جوش ٦۹
۳-۸-٦. پر نشدن درز اتصال ۷۰
۳-۸-۷. ذوب اضافی ۷۱
۳-۸-۸. تنش باقی‌مانده ۷۱
۳-۸-۹. ترک ۷۳
۳-۸-۱۰. اعوجاج ۷٦
۳-۹. نکات ایمنی ۷۷
۳-۱۰. نمونه سؤال ۷۸
کتابنامه ۸۱
واژه‌نامه انگلیسی-فارسی ۸۳
واژه‌نامه فارسی-انگلیسی ۹٥

پیش‌گفتار

در دنیای امروز، علوم و فنون نه‌تنها پیچیده و گسترده‌اند بلکه با سرعت بالایی در حال گسترش و تغییر هستند. از طرفی، بدیهی است که پیشرفت در هر زمینه‌ای به درک عمیقِ مفاهیم و اصول بنیادی مربوطه نیاز دارد. بنابراین بسیار مهم است که دانشجو ضعف و نیاز خود را بشناسد و متناسب با آن در جهت‌دهی به فرآیند آموزش به آموزگار و استاد خود کمک کند.

مطالب این کتاب حاصل پنج سال تدریس اینجانب در کارگاه‌های دانشگاه صنعتی شریف است. بازخوردها و سؤالات مطرح‌شده در کلاس ابزاری مهم در یافتن و برطرف کردن نقایص آن بود و به‌تدریج کمک کرد تا به یک هم‌زبانیِ مؤثر با دانشجویان و تکنیسین‌ها دست یابم. تدریس برای دانشجویان مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشدِ رشته‌های مختلفِ مواد، مکانیک، عمران، برق، مهندسی شیمی و صنایع این فرصت را فراهم کرد تا با نگاهی چندجانبه به فرآیندهای شکل‌دهی و اتصال فلزات، کتاب حاضر را آماده کنم.

حجم قابل‌توجهی از مطالبِ جذاب و بعضاً مهمِ این کتاب به بخش‌هایی با عنوانِ «مطالعه بیش‌تر» منتقل شده‌است. دانشجویان علاقه‌مند می‌توانند مشروح این بخش‌ها را از مدرس یا مربی کارگاه بخواهند و یا با کمک کلیدواژه‌های فارسی و انگلیسی ارائه‌شده به جستجوی توضیحات، تصاویر و فیلم‌های مربوطه بپردازند. همچنین مدرس یا مربی محترم می‌تواند به‌فراخور تخصص خود، این مطالب را در برنامه درسی وارد کند.

در پایان از اساتید گرامی پروفسور امیرحسین کوکبی و دکتر مجتبی موحدی و همچنین مسئولین محترم کارگاه پروژه دانشکده مهندسی و علم مواد و کارگاه‌های مرکزیِ دانشگاه صنعتی شریف قدردانی می‌کنم که غنای این کتاب حاصل راهنمایی‌های ارزشمند ایشان است.

از آقایان مهدی تاج‌دینی و حامد نصرآبادی که در طراحی جلد و انتشار کتاب نقش مؤثری داشتند نیز کمال سپاس را دارم. امید است این خدمت کوچک مورد قبول درگاه حق‌تعالی قرار گیرد و خوانندگان گرامی، بنده حقیر را از نظرات ارزشمند خود بی‌نصیب نگذارند.

مسعود فکوری حسن‌آبادی
دانش‌آموخته دکتری مهندسی و علم مواد
دانشگاه صنعتی شریف
تابستان ۱۳۹۸

فهرست نشانه‌ها، نمادها و کوته‌نوشت‌ها

انجمن مواد و آزمون آمریکا	ASTM
ورق رنگی	PPGI
مؤسسه فولاد و آهن آمریکا	AISI
مؤسسه استاندارد آلمان	DIN
عمق تار خنثی از سطحِ تحت کشش	t_n
حد مجاز خم	BA
زاویه خم	θ
شعاع خم	r
ضخامت ورق	T
فاکتور K	K_b
کسری خم	BD
عقب‌نشینی خارجی	$OSSB\ or\ OS$
طول ورق تخت	L_t
نوعی فولاد	C20
جوشکاری فشاری گرم	HPW
جوشکاری پتکه‌ای یا آهنگری	FOW
جوشکاری غلتکی	ROW
جوشکاری هم‌فشارکاری	CEW
جوشکاری نفوذی	DFW
جوشکاری القایی	IW
جوشکاری مقاومتی سربه‌سر	UW
جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای	RSW

جوشکاری مقاومتی نواری	RSEW
جوشکاری گاز پرفشار	PGW
جوشکاری انفجاری	EXW
جوشکاری اصطکاکی	FRW
جوشکاری اصطکاکی تلاطمی	FSW
جوشکاری اصطکاکی خطی	LFW
جوشکاری فشاری سرد	USW
جوشکاری فشاری سرد	CW
اتصال با فاز مایع گذرا	TLP
جوشکاری الکترود تنگستنی با گاز محافظ	GTAW
جوشکاری الکترود تنگستنی با گاز خنثی	TIG
جوشکاری الکترود مصرفی با گاز محافظ	GMAW
جوشکاری الکترود مصرفی با گاز خنثی	MIG
جوشکاری الکترود مصرفی با گاز فعال	MAG
جوشکاری قوس پلاسما	PAW
جوشکاری الکتروگازی	EGW
جوشکاری هیدروژن اتمی	AHW
جوشکاری قوسی کربنی	CAW
جوشکاری قوسی با الکترود بدون پوشش	BMAW
جوشکاری قوسی با الکترود پوشش‌دار	SMAW
جوشکاری الکترود دستی	MMA
جوشکاری زیرپودری	SAW
جوشکاری قوسی توپودری	FCAW / FCA
جوشکاری جرقه‌ای	FW
جوشکاری زائده‌ای	SW

جوشکاری تصادمی الکتریکی	PEW
جوشکاری سرباره الکتریکی	ESW
جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای	RSW
جوشکاری مقاومتی نواری	RSEW
جوشکاری مقاومتی با بسامد بالا	HFRW
جوشکاری پیش‌طرحی	PW
جوشکاری پرتو الکترونی	EBW
جوشکاری لیزر	LBW
جوشکاری گدازی	FLOW
جوشکاری القایی	IW
جوشکاری اکسی استیلن	OAW
جوشکاری اکسی هیدروژن	OHW
جوشکاری هوا استیلن	AAW
جوشکاری ترمیت	TW
فلز پایه	BM
فلز جوش	WM
آزمون غیرمخرب	NDT
منطقه متأثر از حرارت	HAZ
آزمون فراصوتی	UT
آزمون رادیوگرافی	RT
نیرو	F
استحکام نرمال	σ
استحکام برشی	τ
قطر	d
مساحت	A

انجمن جوشکاری آمریکا	AWS
انجمن مهندسین مکانیک آمریکا	ASME
وضعیت‌های جوشکاری تخت	F
وضعیت‌های جوشکاری افقی-تخت	HF
وضعیت‌های جوشکاری بالای سر	OH
وضعیت‌های جوشکاری افقی	H
وضعیت جوشکاری رو به بالا	VU
وضعیت جوشکاری رو به پایین	VD
وضعیت جوشکاری تخت جوش نبشی	1F
وضعیت جوشکاری افقی جوش نبشی	2F
وضعیت جوشکاری قائم جوش نبشی	3F
وضعیت جوشکاری بالای‌سر جوش نبشی	4F
وضعیت جوشکاری تخت جوش شیاری	1G
وضعیت جوشکاری افقی جوش شیاری	2G
وضعیت جوشکاری قائم جوش شیاری	3G
وضعیت جوشکاری بالای‌سر جوش شیاری	4G
وضعیت جوشکاری لوله افقی	5G
وضعیت جوشکاری لوله شیب‌دار	6G
مقاومت الکتریکی	R
جریان الکتریکی	I
ولتاژ یا اختلاف پتانسیل الکتریکی	V
جریان متناوب	AC
جریان مستقیم	DC
قطبیت الکترود مثبت یا معکوس	DCEP
قطبیت الکترود منفی یا مستقیم	DCEN

مشخصه ولت-آمپر جریان ثابت یا سراشیبی	CC
مشخصه ولت-آمپر ولتاژ ثابت یا تخت	CV
ولتاژ مدار باز	OCV
سرعت جوشکاری	S
فاکتور تصحیح در رابطه حرارت ورودی	μ
حرارت ورودی به واحد طول جوش	H_{input}
گاز طبیعی فشرده	CNG
گاز مایع	LPG
زمان	t
حرارت تولیدی در جوش مقاومتی	Q_g
حرارت خروجی در جوش مقاومتی	Q_{ex}
ضریب رسانایی حرارتی	K
اختلاف دما	ΔT
طول در رابطه حرارت خروجی	l
فاکتور هندسی در رابطه حرارت خروجی	G
ترک خوردگی تنشی	SCC
دستورالعمل فرآیند جوشکاری	WPS
دستورالعمل اجرایی جوش	PQR
عیب نفوذ ناقص	LOP
عیب ذوب ناقص	LOF
منطقه ذوب جزئی	PMZ
فولاد کم‌آلیاژ استحکام‌بالا	HSLA

۱

فلزات و فرآیندهای تولید قطعات فلزی

از دیرباز بخش عمده‌ای از مواد در سازه‌ها کاربرد داشته‌اند. مواد سازه‌ای[1] به‌طور کلی به چهار دسته فلزات، پلیمرها، سرامیک‌ها و کامپوزیت‌ها تقسیم می‌شوند. مواد مرکب یا کامپوزیت‌ها در واقع مخلوطی از دو یا چند ماده از سه دسته اول هستند. خواص مکانیکی مواد سازه‌ای به دیگر خواص آن‌ها (از جمله خواص الکتریکی، مغناطیسی، شیمیایی و یا نوری) ارجحیت دارد. سرامیک‌ها مقاومت بالاتری در دمای بالا و محیط‌های خورنده نشان می‌دهند، اما نسبت به فلزات چقرمگی[2] بسیار پایینی دارند. به‌عبارت دیگر، سرامیک‌ها ترد[3] هستند و در برابر ضربه‌های مکانیکی و شوک‌های حرارتی ضعیف عمل می‌کنند. پلیمرها چگالی کمی دارند و به کاهش وزن سازه کمک می‌کنند. همچنین تولید قطعات پیچیده از آن‌ها ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر است. با این وجود، پلیمرها استحکام و دمای تحملِ بسیار پایین‌تری نسبت به فلزات و سرامیک‌ها ارائه می‌کنند. به‌همین خاطر سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌های آن‌ها هنوز نتوانسته‌اند جایگزین مطمئنی برای فلزات، آلیاژها و کامپوزیت‌های زمینه‌فلزی در بسیاری از سازه‌ها باشند.

۱-۱. خواص مکانیکی سازه‌های فلزی

خواص مکانیکی خواصی هستند که واکنش ماده را به انواع نیرو نشان می‌دهند. ضعف مکانیکی مواد در هر سازه‌ای را باید در سه سطح بررسی کرد؛ ۱) ترکیب شیمیایی و پیوندهای

---

[1] . Structural materials
[2] . Toughness
[3] . Brittle

بین اتمی، ۲) دانه‌بندی[۱] و ریزساختار[۲]، ۳) طراحی سازه و عیوب درشت[۳]، که در ادامه تشریح خواهند شد.

۱- ترکیب شیمیایی و پیوندهای بین‌اتمی: شکست ماده به‌معنای شکست پیوندهای بین‌اتمی است. هر نوع اتمی تمایل به ایجاد پیوندی خاص با اتمِ هم‌نوع یا غیرهم‌نوع خود دارد. استحکام نظری[۴] و رفتار کشسان[۵] ماده وابسته به این پیوندها است. همچنین ماهیت پیوند و ساختار الکترونی مواد از عوامل تعیین‌کننده چقرمگی آن‌هاست. سرامیک‌ها به‌واسطه پیوندهای یونی-کووالانسیِ[۶] خود ترد هستند. اما پیوندهای فلزی به فلزات اجازه می‌دهد تا چقرمه باشند و تغییرشکل مومسان[۷] بدهند. معمولاً فلزات به‌صورت خالص بسیار نرم هستند و به‌منظور افزایش استحکام (به‌خصوص استحکام تسلیم[۸]) آلیاژی می‌شوند. فولادها[۹] به‌عنوان آلیاژِ آهن از پرمصرف‌ترین مواد سازه‌ای هستند. ساده‌ترین فولاد از افزودن کربن به آهن تولید می‌شود.

مطالعه بیش‌تر

۱- در مورد انواع تغییرشکلِ کشسان، مومسان، خزشی، گرانرو-کشسان و گرانرو-مومسان تحقیق نمایید.

۲- «آلیاژ» به ترکیبی از عناصر فلزی و یا ترکیبی از یک یا چند عنصر فلزی با عناصر غیرفلزی گفته‌می‌شود. آلیاژی کردن یک فلز چگونه باعث تغییر خواص آن می‌شود؟

---

[1] . Grain structure
[2] . Microstructure
[3] . Macroscopic defects
[4] . Theoretical strength
[5] . Elastic behaviour
[6] . Ionic-covalent bonds
[7] . Plastic deformation
[8] . Yield strength
[9] . Steels

۲- دانه‌بندی و ریزساختار (نوع فازها[۱] و عیوب بلوری[۲]): یک ماده با ترکیب شیمیایی مشخص می‌تواند خواص متفاوتی از خود نشان دهد. هنگام انجماد فلزات، اتم‌ها تمایل دارند به‌صورت منظم کنار یک‌دیگر قرار گیرند و تشکیل بلور[۳] دهند. معمولاً اتم‌ها در نقاط مختلفِ مذاب شروع به مرتب شدن می‌کنند، یا در اصطلاح جوانه‌زنی می‌کنند. این جوانه‌ها رشد می‌کنند تا به یک‌دیگر برسند. در نهایت آن‌چه بعد از انجماد باقی می‌ماند تعداد زیادی بلور است که به‌هرکدام یک دانه[۴] گفته‌می‌شود. شکل و اندازه این دانه‌ها تعیین‌کننده دانه‌بندی است. هرچه دانه‌ها ریزتر باشند استحکام و چقرمگی ماده بالاتر است. در داخل هر دانه، روش‌های مختلفی برای چینش اتم‌ها وجود دارد که موجب ایجاد فازهای مختلف می‌شود. به‌عبارتی هر فاز یک چینشِ منحصر به‌فرد از اتم‌های خاص است. فولادها می‌توانند سه نوع فاز آستنیت[۵]، فریت[۶] و سمنتیت[۷] داشته‌باشند، که در نهایت منجر به ظهور ریزساختارهای متفاوتی از جمله فریتی، پرلیتی[۸]، بینایتی[۹]، مارتنزیتی[۱۰]، آستنیتی و یا مخلوطی از آن‌ها می‌شوند. مارتنزیت ریزساختاری بسیار سخت و البته ترد است که برای مثال با سرد شدن سریعِ فولادهای پرکربن ایجاد می‌شود. عیوب بلوری به مناطقی از بلور گفته‌می‌شود که نظم اتم‌ها در آن‌ها به‌هم‌ریخته باشد. این عیوب نیز می‌توانند باعث تغییر استحکام و چقرمگی ماده شوند. افزایش سرعت سرد کردن از دماهای بالا و یا تغییرشکل سرد می‌تواند عیوب بلوری را افزایش دهد.

مطالعه بیش‌تر

منظور از یک دانه و یک بلور به‌خصوص در آلیاژها معمولاً متفاوت است، چرا؟

---

[1] . Phases
[2] . Crystallographic defects
[3] . Crystal
[4] . Grain
[5] . Austenite
[6] . Ferrite
[7] . Cementite
[8] . Pearlite
[9] . Bainite
[10] . Martensite

۳- عیوب درشت و طراحی سازه: هنگامی‌که به یک سازه نیرو وارد می‌شود، ممکن است به مناطقی از آن تنشی بیش‌تر از آن‌چه انتظار می‌رود وارد گردد. افزایش تنش در نقاط خاص ناشی از دو عامل است؛ ۱) تمرکز تنش در اطراف عیوب یا در گوشه‌های تیز و ۲) تنش‌های باقی‌مانده در ماده. عیوب درشت می‌توانند به‌صورت ترک، حفره، تخلخل و آخال[۱] باشند. تنش‌های حرارتی باقی‌مانده به‌طور کلی ناشی از انقباض ناهمگن سازه هستند. در دمای پایین، فلزات مدول کشسان بیش‌تر، استحکام تسلیم بالاتر و شکل‌پذیری[۲] کم‌تری دارند یا به‌عبارتی صلب‌تر هستند. بنابراین حین سرد شدن، قسمت‌هایی از سازه که دمای کم‌تری دارند از انقباض قسمت‌های گرم‌تر جلوگیری می‌کنند، و تنش‌هایی بین این دو منطقه ایجاد می‌شود. اگر تنش ایجادشده بیش‌تر از استحکام تسلیم ماده باشد سازه را دچار اعوجاج[۳] می‌کنند، در غیر این‌صورت به‌صورت تنش پسماند باقی می‌ماند.

۱-۲. فرآیندهای تولید سازه‌های فلزی

فرآیندهای ساخت قطعات و سازه‌های فلزی را می‌توان در چهار دسته قرار داد؛ ۱) ریخته‌گری[٤] و قالب‌گیری[٥]، ۲) ماشین‌کاری[٦]، ۳) اتصال[۷]، و ٤) برشکاری[۸] و شکل‌دهی[۹]. در دسته اول، قطعه با ریخته‌گریِ مذابِ فلز در یک قالب و انجماد آن تولید می‌شود. هرچه نقطه ذوب[۱۰] فلز پایین‌تر و سیالیت مذاب آن بیش‌تر باشد، آن فلز برای ریخته‌گری مناسب‌تر است. در روش ماشین‌کاری، قطعه با حذف اضافات یا در اصطلاح براده‌برداری به‌کمک تجهیزاتی چون دستگاه تراش[۱۱]، دریل و CNC[۱۲] تولید می‌شود.

---

[1] . Inclusion
[2] . Ductility
[3] . Distortion
[4] . Casting
[5] . Molding
[6] . Machining
[7] . Joining
[8] . Shearing
[9] . Forming
[10] . Liquidus temperature
[11] . Lathe
[12] . Computer Numerical Control

مطالعه بیش‌تر

۱- به عناصر ناخواسته در ساختار اتمی، ناخالصی گفته‌می‌شود، اما اگر این عناصر از انحلال خارج شوند و فاز ناخواسته‌ای تشکیل دهند به آن آخال گفته‌می‌شود. به‌عبارتی آخال یک فاز ناخواسته در ریزساختار ماده است که می‌تواند از ناخالصی‌ها و یا حتی از عناصر خود ماده تشکیل شود. برای مثال اکسیدها، کاربیدها و سولفیدها معمولاً جزء آخال‌ها محسوب می‌شوند که از واکنشِ عناصر ماده با (به‌ترتیب) اکسیژن، کربن و گوگرد تشکیل می‌شوند. تفاوت ناخالصی و عنصر آلیاژی چیست؟

۲- چه تفاوتی بین خواص مکانیکی ذیل وجود دارد؟ هر خاصیت چه‌زمانی اهمیت پیدا می‌کند؟

استحکام نظری، مدول کشسان، استحکام تسلیم، سختی، کارسختی یا کرنش‌سختی، استحکام نهایی، شکل‌پذیری، چکش‌خواری، چقرمگی شکست، رفتار خستگی، و خزش.

اتصال می‌تواند به سه صورت انجام شود؛ ۱) بستن مکانیکی[1]، ۲) چسب[2] و ۳) اتصال متالورژیکی[3]. روش‌های مکانیکی مانند پرچ[4] و پیچ و مهره نوعی اتصال موقت یا نیمه‌موقت ایجاد می‌کنند. هنگامی‌که به تعویض یا تعمیر دوره‌ای قطعات نیاز باشد، بستن مکانیکی مفید است. چسب‌ها (پلیمری یا سرامیکی) نوعی اتصال شیمیایی ایجاد می‌کنند که می‌تواند دائمی یا موقت باشد. در مواقعی که نیاز به آب‌بندی باشد، چسب‌ها به اتصالات مکانیکی ارجحیت دارند. چسب‌ها عمدتاً با پیوندهای ضعیف واندروالس[5] و هیدروژنی[6] به زیرلایه می‌چسبند.

---

[1]. Mechanical Fastening
[2]. Adhesive
[3]. Metallurgical bonding
[4]. Rivet
[5]. Van der waals bond
[6]. Hydrogen bond

همچنین بخشی از نیروی چسبندگی می‌تواند ناشی از ریزدرگیری‌های مکانیکی[1] با ناهمواری‌های سطح زیرلایه باشد.

پیوندهای قوی‌ترِ بین‌اتمی معمولاً با فرآیندهای حرارتی ایجاد می‌شوند که به آن‌ها پیوند شیمیایی یا متالورژیکی گفته‌می‌شود. فرآیندهای اتصال‌دهی متالورژیکی را براساس وقوع پدیده ذوب می‌توان در سه دسته گنجاند؛ جوشکاری ذوبی[2]، جوشکاری حالت جامد[3] و لحیم‌کاری. اگر دو سطح مواد تحت اتصال، ذوب و در هم امتزاج پیدا کند، فرآیند استفاده‌شده «جوشکاری ذوبی» خواهد بود. فلز پرکننده[4] نیز در صورت استفاده در این فرآیند ذوب می‌شود. اگر هیچ‌گونه استحاله ذوبی در مواد تحت اتصال و پرکننده اتفاق نیفتد، فرآیند را «جوشکاری حالت جامد» گویند. در لحیم‌کاری، یک فلز پرکننده (لحیم) ذوب شده و با مواد تحت اتصال پیوند متالورژیکی برقرار می‌کند، بدون آن‌که سطوح تحت اتصال ذوب شوند. لحیم‌کاری سخت[5] و نرم[6] به‌ترتیب در دمایی بالاتر و پایین‌تر از ۴۵۰ °C انجام می‌شوند. برخلاف فرآیندهای جوشکاری، اتصالات لحیم‌شده می‌توانند موقت باشند و با حرارت‌دهیِ مجدد باز شوند.

در فرآیندهای شکل‌دهی از نیروی کافی برای تغییر شکل مومسانِ فلز استفاده می‌شود. تغییر شکل مومسان، برخلاف تغییر کشسان، بعد از باربرداری در قطعه باقی می‌ماند. گاه برای کاهش تنش تسلیم و/یا افزایش شکل‌پذیری قطعه نیاز است که فرآیند در دمایی بالاتر از دمای محیط انجام شود که به آن شکل‌دهیِ گرم گفته می‌شود. ورق‌کاری[7]، که در این کارگاه به‌صورت عملی آموزش داده‌می‌شود، یکی از نمونه‌های فرآیند برشکاری و شکل‌دهی است. ورق[8] از لحاظ ضخامت بین دو شکلِ فویل[9] و صفحه[10] قرار می‌گیرد. معیارِ ضخامتیِ دقیق

---

[1] . Micro-mechanical interlocking
[2] . Fusion welding
[3] . Solid state welding
[4] . Filler
[5] . Brazing
[6] . Soldering
[7] . Sheet metal working
[8] . Sheet
[9] . Foil
[10] . Plate

برای این دسته‌بندی به کاربرد، جنس فلز، سنجه[1] و مشخصات محصول بستگی دارد. اما به‌طور تقریبی می‌توان گفت فویل‌ها ضخامتی کم‌تر از ۰/۲ mm دارند و صفحات ضخیم‌تر از ٦ mm هستند.

مطالعه بیش‌تر

۱- فرآیندهای تولید ذیل در چه دسته‌ای قرار می‌گیرند و چه کاربردی دارند؟

تف‌جوشی یا متالورژی پودر، پوشش‌دهی، نورد، حدیده‌کاری، کشش سیم، و آهنگری.

۲- شمش، شمشه، شمشال و تختال به‌عنوان محصولات نیمه‌ساخته ریخته‌گری، چه تفاوتی با هم دارند؟

فرآیندهای ماشین‌کاری و برشکاری از نوع ساختِ کاهنده[2] هستند، یعنی قطعه نهایی با حذف گزینشی از ماده اولیه تولید می‌شود. روش‌های ریخته‌گری و شکل‌دهی از نوع ساخت شکل‌دهنده[3] هستند، بدین معنی که ماده اولیه در اثر اعمال نیرو به شکل نهایی در می‌آید. ساختِ فزاینده[4] نیز گروهی دیگر از روش‌های ساخت و تولید است که امروزه در کانون توجه قرار دارد. انجمن مواد و آزمون آمریکا (ASTM[5]) این گروه از فرآیندها را این‌گونه تعریف می‌کند: «برخلاف فرآیندهای ساختِ کاهنده و شکل‌دهنده، ساختِ فزاینده فرآیندِ اتصال مواد برای ایجاد یک قطعه از داده‌های مدل سه‌بعدیِ آن است که معمولاً به‌صورت لایه‌به‌لایه انجام می‌شود». چاپگرِ سه‌بعدی[6] از تجهیزات اصلی ساختِ فزاینده است که به‌کمک آن ذرات مواد به‌تدریج روی هم سوار می‌شوند تا قطعه نهایی ساخته‌شود. این فرآیند مشابه

---

[1] . Gauge
[2] . Subtractive manufacturing
[3] . Formative manufacturing
[4] . Additive manufacturing
[5] . American Society for Testing and Materials
[6] . 3D printing

ساخت دیوار با چیدن آجرها روی هم است. اتصال بین ذرات می‌تواند به‌صورت چسبی یا متالورژیکی باشد.

۱-۳. فلزات پرکاربرد در سازه‌ها

قابلیت آلیاژسازی فلزات و همچنین نیاز به آن‌ها در کاربردهای متنوع باعث شده‌است که طیف گسترده‌ای از آلیاژها وجود داشته‌باشد. در ادامه سعی شده‌است تا بخشی از فلزات و آلیاژهای پرکاربرد در ایران، که در زندگی روزمره نیز با آن‌ها برخورد می‌شود، معرفی گردد.

۱-۳-۱. آلیاژهای آهنی

اغلب فلزات به‌صورت خالص نرم هستند و قابلیت استفاده در سازه‌ها را ندارند. استحکام تسلیم آهن خالص به حدود ۵۰ MPa می‌رسد. کربن، کروم و نیکل سه عنصرِ آلیاژی مهم برای آهن هستند که خواص ویژه‌ای به آن می‌دهند.

۱-۳-۱-۱. فولاد

آلیاژهای آهنی که زیر ۲/۱ ٪ وزنی کربن دارند، در دسته فولادها قرار می‌گیرند. آن‌چه در بازار ایران به نام «آهن» فروخته‌می‌شود در واقع فولادهای ساده کربنی هستند. در بازار آهن ایران اصطلاحاتی برای فولاد به‌کار می‌رود که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود.

ورق گرم یا سیاه: ورق یا صفحاتی از فولاد ساده کربنی هستند که به‌روش نورد گرم تولید شده‌اند. این ورق‌ها هیچ‌گونه پوششی ندارند و به‌علت اکسیده‌شدن حین نورد تیره‌رنگ هستند. در ساخت کمد، قفسه و حتی مخازن تحت فشار استفاده می‌شوند.

ورق اسیدشویی: به‌منظور حذف لایه‌های اکسیدی از روی ورق گرم، ممکن است آن را اسیدشویی کنند. این ورق‌ها سطحی روشن‌تر اما مات[1] دارند. لحیم‌کاری، رنگ‌آمیزی و نورد سرد این ورق‌ها آسان‌تر است.

[1] . Matte

ورق سرد یا روغنی: ورق فولادی که به‌روش نورد سرد تولید می‌شود معمولاً سطح روشن‌تری نسبت به ورق گرم دارد. حین نورد سرد از نوعی روغن برای کاهش اصطکاک بین ورق و غلتک‌ها و همچنین خارج کردن حرارتِ ایجادشده استفاده‌می‌شود. وجه تسمیه «روغنی» احتمالاً از آغشته بودن ورق به این روغن‌ها است.

ورق سفید یا گالوانیزه: قطعات تولیدشده از ورق‌های قبلی حساس به خوردگی هستند و استفاده از رنگ یا پوشش برای آن‌ها ضروری است. گاه برای افزایش مقاومت به خوردگی، ورق‌ها با لایه‌ای از روی یا روی–سرب پوشش داده‌می‌شوند که در این حالت به آن‌ها گالوانیزه گفته‌می‌شود. ورق‌های گالوانیزه سطح سفیدتری نسبت به سه ورق قبلی دارند، اما می‌توانند براق[1] یا مات باشند. این ورق‌ها در تولید کانال تهویه، دودکش، شیروانی‌ها و تیر چراغ برق کاربرد دارند.

ورق رنگی: ورق گالوانیزه رنگ‌شده است (PPGI[2]).

حلب[3]: روی مقاومت به خوردگی کمی دارد و به‌راحتی در مواد غذاییِ اسیدی حل می‌شود. لذا برای تولید ظروف محتوی مواد غذایی معمولاً از حلب (ورق قلع‌اندود) استفاده‌می‌شود. برای مثال، قوطی کنسرو و ظرف‌های روغن نباتی از جنس حلب هستند.

استیل: فولادهایی که حاوی حداقل ۱۰/۵٪ کروم هستند می‌توانند در برابر زنگ‌زدگی مقاومت کنند، که به آن‌ها فولاد زنگ‌نزن[4] گفته‌می‌شود. این فولادها در بازار ایران به نام «استیل» شناخته‌می‌شوند. از ویژگی اصلی فولادهای زنگ‌نزن آن است که در صورت پولیش مناسب، برای مدت‌های طولانی براق خواهند ماند. فولادی که دارای فاز فریت است، به آهنربا جذب می‌شود و به آن «استیل بگیر» گفته‌می‌شود. در مقابل فولادِ آستنیتی یا «نگیر» این ویژگی را ندارد. جدول ۱-۱ چند فولاد پرکاربرد در صنعت ایران را مقایسه می‌کند. فولادهای آستنیتی دارای مقدار نیکل بالایی هستند، و مقاومت به خوردگی و البته قیمت بالاتری دارند. فولاد زنگ‌نزن فریتی برای ساخت وسایلی مناسب است که تماس مستقیم با محیط مرطوب

---

[1] . Shiny
[2] . Pre-Painted Galvanised Iron
[3] . Tinplate
[4] . Stainless steel

ندارند، مانند قفسه‌ای که قرار نیست رنگ یا پوشش داده‌شود. سینک ظرفشویی، مخازن حمل اسید و قاشق و چنگال نمونه‌هایی از کاربرد فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی هستند. فولاد یا داپلکس نوعی از فولاد زنگ‌نزن است که از حضور هر دو فاز بهره می‌برد. فولاد داپلکس معمولاً خواص مکانیکی بسیار بالایی دارد و مقاومت به خوردگی آن در محیط‌های دریایی و صنایع پتروشیمی خوب است.

جدول ۱-۱. ترکیب شیمیایی و خواص چهار فولاد پرکاربرد در صنعت ایران

کلاسه AISI[2]	کلاسه DIN[3]	ترکیب شیمیایی (wt.%)	نوع فولاد (اصطلاح بازاری)	ریزساختار	استحکام تسلیم و نهایی (MPa)
	St 37-2	C (0.17-0.21), Mn (<1.4)	ساده کربنی (آهن)	فریتی-پرلیتی	۲۳۵ و ۴۶۰-۳۶۰
316		C (<0.08), Cr (16-18), Ni (10-14), Mn (<2), Si (<0.75), Mo (2-3)	زنگ‌نزن آستنیتی (استیل نگیر)	آستنیتی	۲۰۵ و ۵۱۵
430		C (<0.08), Cr (16-18), Ni (0.5), Mn (<2), Si (<0.75), Mo (2-3)	زنگ‌نزن فریتی (استیل بگیر)	فریتی	۳۱۰ و ۴۸۳
2205		C (<0.03), Cr (22-23), Ni (4.5-6.5), Mn (<2), Si (<1), Mo (3-3.5)	زنگ‌نزن دوفازی (داپلکس)	آستنیتی-فریتی	۴۴۸ و ۶۲۱

۱-۳-۱-۲. چدن[4]

چدن‌ها آلیاژهای آهنی هستند که بالای ۲/۱ ٪ وزنی کربن دارند. این حجم از کربن به سه شکل در چدن ظاهر می‌شود؛

۱) محلول: مشابه آن‌چه در فولاد اتفاق می‌افتد، کربن می‌تواند در ساختار آهن حل شود.

---

[1] . Duplex
[2] . American Iron & Steel Institute
[3] . Deutsches Institut für Normung
[4] . Cast iron

۲) ترکیبی: منظور به‌صورت کاربید (Fe_3C، سمنتیت) است. کاربید در فولادها در ریزساختار پرلیت دیده‌می‌شود. اما در چدن سفید[1] می‌تواند به‌صورت ذرات درشت و مجزا باشد.
۳) غیرترکیبی: فازی که در فولادها یافت نمی‌شود کربن آزاد یا گرافیت[2] است. گرافیت‌ها در چدن خاکستری[3] به‌شکل ورقه‌ای[4]، در چدن داکتیل[5] به‌شکل کروی-کرمی‌شکل[6]، و در چدن چکش‌خوار[7] به‌شکل برفکی (کروی نامنظم[8]) هستند.

چدن‌ها اگرچه قابلیت جوشکاری[9] کمی دارند، اما بسیار مناسبِ ریخته‌گری هستند. از ویژگی‌های دیگر چدن‌ها می‌توان به تردی زیاد (چقرمگی کم)، استحکام کششی و خمشی پایین، استحکام فشاری خوب و مقاومت به خوردگی مناسب اشاره کرد. به‌همین خاطر است که مواد اولیه چدنی معمولاً به‌صورت شمش و ضایعات هستند و ورق چدنی تولید نمی‌شود. چدن‌ها در ساخت قطعات با اشکال پیچیده مانند مجسمه‌ها و المان‌ها، قطعاتی که با آب در تماس هستند مانند سرِ چاه و سازه‌هایی که تحت تنش کششیِ کمی قرار دارند مانند پل‌ها کاربرد دارند.

۱-۳-۲. فلزات رنگین

فلزات غیرآهنی در بازار ایران در دسته فلزات رنگین قرار می‌گیرند. از مهم‌ترین فلزات و آلیاژهای این دسته عبارتند از:

مس: هدایت حرارتی و الکتریکی بالایی دارد و همچنین در برابر خوردگی مقاوم است. سیم برق و گرماگیر[10] نمونه‌هایی از کاربرد مس است. مس خالص رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای دارد و در اثر اکسیده‌شدن به سیاه می‌گراید. افزودن مقادیر جزئی عناصر آلیاژی، خواص مکانیکی

---

[1] . White cast iron
[2] . Graphite
[3] . Grey cast iron
[4] . Flakes
[5] . Ductile cast iron
[6] . Nodular
[7] . Malleable cast iron
[8] . Spheroidal
[9] . Weldability
[10] . Heat sink

آن را به‌شدت بالا می‌برد. برای مثال الکترود جوشکاریِ مقاومتی با افزودن کم‌تر از ۲٪ وزنی کروم و زیرکونیوم به مس خالص تهیه می‌شود.

برنز[1]: آلیاژ مس با قلع، آلومینیوم و یا سیلسیم است. معمولاً منظور از برنز، آلیاژ مس-قلع است که به رنگ قهوه‌ای-نارنجی دیده‌می‌شود. مفرغ[2] نیز نوعی آلیاژ مس-قلع-روی و به رنگ خاکستری است. سختی و استحکام برنز نسبت به مس خالص بیش‌تر است و معمولاً در ساخت ظروف تزئینی کاربرد دارد.

برنج[3]: آلیاژ مس-روی است و رنگ آن، بسته به میزان روی، از قرمز به زردِ شفاف تغییر می‌کند. برنج در ساخت ظروف تزئینی، شیرآلات و ظروف پخت غذا به‌کار می‌رود. برای جلوگیری از وارد شدن گونه‌های مسی به غذا، معمولاً سطح داخلی ظروف مسی (برنجی) با قلع پوشش داده‌می‌شود.

آلومینیوم: به‌صورت تقریباً خالص در کابل‌های فشار قوی کاربرد دارد چون رسانایی الکتریکی بالایی دارد. آن بخش از آلومینیوم که در سازه‌ها به‌کار می‌رود معمولاً آلیاژی است. در دماهای پایین که اکثر فولادها ترد هستند، آلومینیوم چقرمگی قابل قبولی دارد. به‌دلیل سبکی (چگالیِ کم) در صنعت هوافضا نیز کاربرد زیادی دارد. همچنین در ساخت ظروف پخت و پز به‌کار می‌رود که در ایران به ظروف روحی یا رویی معروف است. قوطی نوشیدنی‌ها، در و پنجره، فویل بسته‌بندی و رینگ خودرو از دیگر مثال‌های کاربرد آلومینیوم است. استفاده از فرآیندهای جوشکاری که با ذوب فلز همراه است برای آلومینیوم و آلیاژهای آن آسان نیست.

---

[1] . Bronze
[2] . Gunmetal
[3] . Brass

مطالعه بیش‌تر

۱- در بین مواد معرفی‌شده، فولادها (به‌جز آستنیتی‌ها) و چدن‌ها (به‌جز زمینه‌آستنیتی‌ها) جذب آهنربا می‌شوند. با این‌حال اگر یک آهنربا از کنار فلزاتی مانند مس، آلومینیوم و نقره گذر کند، ممکن است برهم‌کنشی بین فلز و آهنربا حس شود. علت آن چیست؟ راهنمایی: قانون لنز!

۲- در بازار و یا آثار باستانی ایران، اسامی ذیل نیز به چشم می‌خورد. جنس و کاربرد هر کدام را بیابید.

فولاد دریایی، فولاد نسوز، نای‌هارد، ضد اسید، ضد باز، آجدار، ضدخش، آلوزینک، ورشو، مسوار، مونل، فولاد دمشق، طلای سفید.

۱-٤. نمونه سؤال

۱- عیوب چگونه باعث کاهش خواص مکانیکی سازه می‌شوند؟

۲- تفاوت ورق روغنی و سیاه در چیست؟

۳- در مبحث ریزساختار مواد، منظور از فاز چیست؟

٤- چرا فولادهای پرکربن مستعد ترد شدن هستند؟

۵- چرا دیواره داخلی ظروف مسی سفید است؟

٦- چرا ظروف مسی در گذر زمان سیاه می‌شوند؟

۷- به چه علت ساخت قطعاتی با شکل پیچیده از چدن آسان‌تر از فولاد است؟

۸- تفاوت اصلی در ترکیب شیمیایی فولاد و چدن چیست؟

۹- چرا حلب‌ها در ساخت ظروف حمل غذا کاربرد زیادی دارند؟

۱۰- کدام یک از ورق‌های معرفی‌شده را برای ساخت کانال کولر توصیه می‌کنید؟ چرا؟

۱۱- تفاوت فرآیندهای ساخت از نوع کاهنده، شکل‌دهنده و فزاینده در چیست؟

۱۲- تفاوت فرآیندهای جوشکاری و لحیم‌کاری را بنویسید.

۱۳- نقاط قوت و ضعفِ مواد فلزی، پلیمری و سرامیکی را ذکر کنید.

۱٤- با توجه به خواصی که برای فولاد و آلیاژهای آلومینیوم ذکر شد، کارایی و کارکرد رینگ‌های فولادی و آلومینیومی را مقایسه کنید.

۱۵- کربن به چند صورت می‌تواند در ساختار آهن حضور داشته‌باشد؟

۱٦- به نظر شما چگونه می‌توان فولاد زنگ‌نزن را از فولاد گالوانیزه تشخیص داد؟

۲

ورق‌کاری

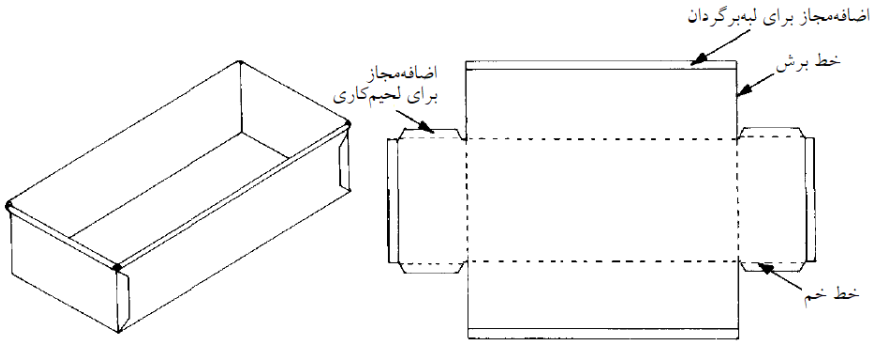
ورق‌کاری مجموعه‌ای از فرآیندهای برشکاری، شکل‌دهی و اتصال ورق‌های فلزی است. کابینت، درهای فلزی و دیگر وسایل سفارشی می‌توانند به‌صورت دستی در کارگاه‌ها ساخته‌شوند. اما بخش عمده‌ای از ورق‌ها در تولید انبوهِ کالاهایی مانند خودرو مصرف می‌شوند که با فرآیندهای خودکار یا نیمه‌خودکار ساخته‌می‌شوند. ابزارآلات بسیار متنوعی در فرآیند ورق‌کاری استفاده می‌شوند که اشاره به تمام آن‌ها موجب اطناب کتاب حاضر خواهد شد. در ادامه سعی بر آن است که خلاصه‌ای از مراحل ورق‌کاری به‌همراه ابزار مورد نیاز ارائه گردد.

۲-۱. گسترش[1]

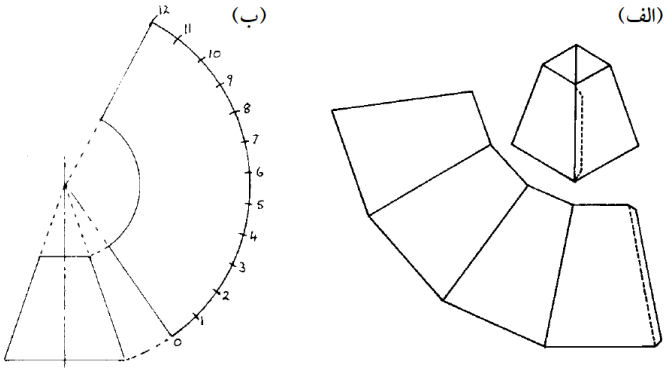
در اولین مرحله از ساخت قطعات سه‌بعدی، الگویی دو بعدی از آن‌ها روی ورق پیاده می‌شود که در اصطلاح گسترش یا نقشه گسترده نامیده‌می‌شود. گسترش محل برش‌ها و خم‌ها را مشخص می‌کند. در اشکال ساده منشوری یا استوانه‌ای، مشابه شکل ۲-۱، گسترش شامل تعدادی خطوط متعامد و موازی است. این خطوط به‌دلیل سادگی می‌توانند مستقیماً روی ورق رسم شوند. اضافات موردنیاز برای اتصال یا لبه‌برگردان[2] نباید فراموش گردد. برای قطعات پیچیده‌تر بهتر است ابتدا الگو روی کاغذ کشیده‌شده و امکان ساخت آن بررسی گردد. برای این کار می‌توان از نرم‌افزارهایی مانند SolidWorks نیز استفاده نمود.

---

[1] . Development
[2] . Hem (single, double or wired)



شکل ۲-۱. گسترش و طرحواره شکل نهایی یک جعبه. لبه‌برگردان می‌تواند به‌صورت یک‌تا، دوتا و یا سیمکشی باشد.

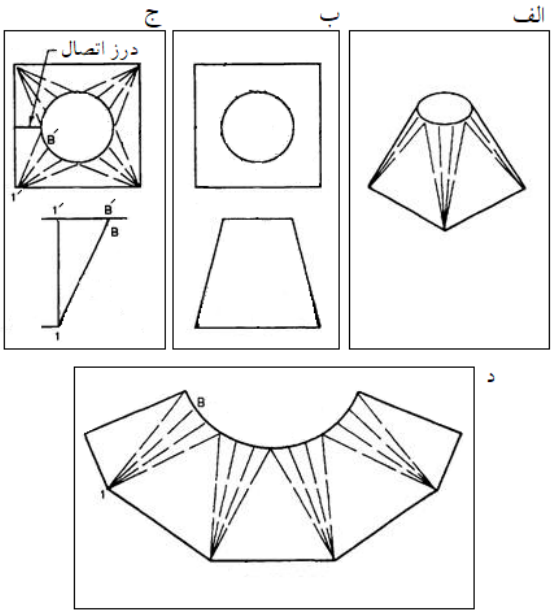


شکل ۲-۲. گسترش الف) هرم با اتصال لبه‌روی‌هم[1] و ب) مخروط ناقص با اتصال سربه‌سر[2].

شکل ۲-۲ گسترش هرم و مخروط را نشان می‌دهد که به‌کمک خطوط شعاعی رسم می‌شوند. منظور از خطوط شعاعی، دسته خطوطی هستند که خود یا امتداد آن‌ها به یک نقطه ختم می‌شود. گسترشِ مخروط ناقص[3] به‌صورت یک واشر ناقص خواهد بود (شکل ۲-۲-ب). شعاع داخلی و خارجی این واشر بر اساس ارتفاع و قطرهای دو انتهای مخروط نهایی محاسبه می‌شود. سپس باتوجه به محیط قاعده مخروط، ناحیه‌ای از این واشر جدا می‌گردد.

[1] . Lap joint
[2] . Butt joint
[3] . Truncated cone

برای سهولت در جدا کردن ناحیه مذکور می‌توان محیط قاعده مخروط را به ۱۲ قسمت[1] تقسیم کرده و اندازه به‌دست آمده را با کمک پرگار[2] روی شعاع خارجی واشر علامت زد. هرچه تعداد قسمت‌ها بیش‌تر باشد، دقت ابعادی مخروط نهایی بیش‌تر خواهد بود.



شکل ۲-۳. نحوه ترسیم گسترش مبدل چهارگوش به دایره؛ الف) طرحواره سه‌بعدی، ب) شکل دوبعدی از بالا و از بغل، ج) نحوه به‌دست آوردن اندازه حقیقی اضلاع مثلث‌ها و د) شکل نهایی گسترش.

در صنعت برای تهیه الگوی بسیاری از اجسام از روش مثلث استفاده می‌شود. شکل ۲-۳ کاربرد این روش را در تولید «مبدل چهارگوش به دایره» نشان می‌دهد. ابتدا تصویر دوبعدی از بالا و بغل رسم می‌شود (شکل ۲-۳–ب). مشابه روش قبل، محیط دایره ایجادشده به ۱۲ قسمت تقسیم می‌شود (شکل ۲-۳–ج). فرض کنیم در این‌جا به‌دنبال طول حقیقی ضلع B1

[1] . Segment
[2] . Compass

روی گسترش هستیم (شکل ۲-۳-د). خطی به اندازه ارتفاع مبدل (1′1) رسم می‌گردد. از انتهای این خط و عمود بر آن، خطی به‌طول 1′B رسم می‌شود. طول خط B1 برابر با فاصله نقطه B′ تا 1 خواهد بود. به‌همین ترتیب طول تمامی اضلاع مثلث‌ها به‌دست می‌آید. اکنون تنها طول مجهول، طول اضلاعی از مثلث‌ها است که روی دایره داخلی گسترش قرار می‌گیرد (شکل ۲-۳-ج). مشابه قبل می‌توان این طول را برابر با یک‌دوازدهم محیط دایره مبدل در نظر گرفت. با داشتن تمامی طول‌ها و به‌کمک پرگار و خط‌کش می‌توان مثلث‌ها را یک‌به‌یک در کنار یک‌دیگر رسم کرد تا شکل کامل گسترش به‌دست آید. برای سادگی کار می‌توان با رسم مثلث متساوی‌الاضلاع شروع کرد.

خط‌کش، گونیا[1]، نقاله[2] و پرگار از مهم‌ترین ابزار اندازه‌گیری در ورق‌کاری هستند. کولیس[3] و ریزسنج[4] نیز به‌خصوص در تعیین دقیق ضخامت ورق کاربرد دارند. برای رسم نقشه روی ورق از ابزار سخت و نوک‌تیز مانند سوزن خط‌کش[5] استفاده‌می‌شود.

مطالعه بیش‌تر

کاربرد و نحوه استفاده هر کدام از ابزار ذیل را بیابید.

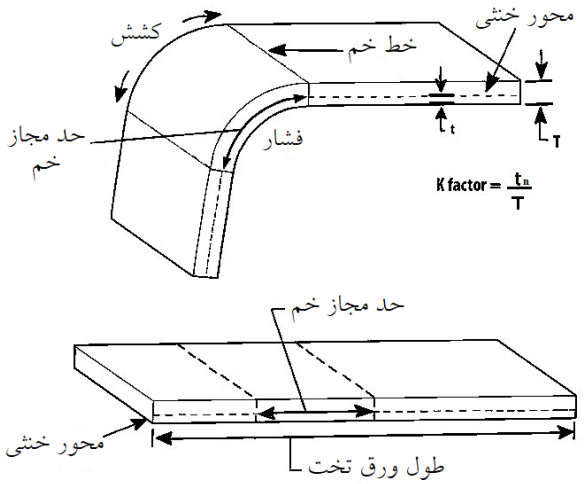
گونیای مرکب، پرگار انتقال اندازه، پرگار تقسیم، پرگار کشوئی، خط‌کش متحرک T.

نکته دیگری که در طراحی گسترش باید لحاظ گردد تغییرات ابعادی ورق در مرحله شکل‌دهی است. همان‌طورکه شکل ۲-٤ نشان می‌دهد، سطوح بیرونی و داخلی ورق هنگام خم‌کاری به‌ترتیب تحت تنش کششی و فشاری قرار گرفته، و در نتیجه دچار ازدیاد و کاهش طول می‌شوند. در عمق مشخصی (t_n) از سطح داخلی ورق، تار خنثی یا محور خنثی قرار گرفته‌است که تنش‌های وارد به آن صفر بوده و تغییرات ابعادی ندارد. حد مجاز خم (BA[6])

---

[1] . Set square
[2] . Protractor
[3] . Calipers
[4] . Micrometer
[5] . Scriber
[6] . Bend Allowance

طولی از تار خنثی است که دچار خمش می‌شود، که به زاویه خم (θ)، شعاع خم (r)، ضخامت ورق (T) و جنس آن بستگی دارد. اثر جنس را می‌توان با فاکتور K_b لحاظ کرد که به‌صورت تجربی به‌دست می‌آید و جداول آن موجود است.



شکل ۲-٤. کشش و فشار در ناحیه خم ورق.

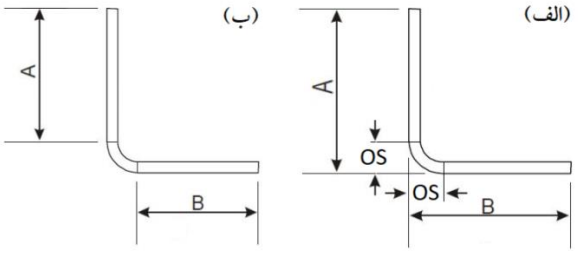
برای اعمال تغییرات ابعادی حین خم‌کاری، می‌توان حد مجاز خم و یا کسری خم (BD[1]) را به‌ترتیب با روابط (۲-۱) و (۲-۲) محاسبه و سپس با توجه به شکل ۲-۵ طول ورق تخت را به‌دست آورد. عقب‌نشینی خارجی که گاه با $OSSB$[2] نشان داده‌می‌شود، در شکل ۲-۵-الف با OS مشخص شده‌است و به‌کمک رابطه (۲-۳) محاسبه می‌شود. در این روابط، ابعاد به mm، زاویه به درجه و K_b بدون بعد است.

$$BA = \frac{\pi \times (r + K_b \times T) \times \theta}{180} \qquad (۲-۱)$$

$$BD = (2 \times OS) - BA \qquad (۲-۲)$$

[1] . Bend Deduction
[2] . OutSide SetBack

$$OS = (r + T) \times \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \qquad (۳-۲)$$



شکل ۲-۵. نحوه محاسبه طول ورق تخت (L_t) مورد نیاز براساس الف) کسری خم یا ب) حد مجاز خم.

مثال

ورقی از جنس فولاد C20 به ضخامت ٤ mm و پهنای ۲۰ mm نیاز دارد که با شعاع ۱۰ mm و زاویه ٦۰° خمیده‌شود. حد مجاز خم را محاسبه نمایید. (K_b = ۰/۵)

جواب: ۱۲/٥٦ mm

۲-۲. برشکاری و سوراخ‌کاری

از ساده‌ترین ابزار برشِ ورق‌های نازک قیچی[1] است. ورق‌های ضخیم‌تر را می‌توان با گیوتین[2] برش زد که می‌تواند به‌صورت قیچی اهرمی[3]، پدالی و برقی باشد. همچنین می‌توان دستگاه‌های پولک‌زنی[4] استفاده کرد که مشابه دستگاه پانچ[1] عمل می‌کنند، با این تفاوت که هدف استخراج شکلی خاص از ورق اولیه است و سوراخ ایجادشده کاربردی ندارد.

---

[1] . Tin snips / aviation snips / shears
[2] . Guillotine
[3] . Bench shear
[4] . Blanking

مطالعه بیش‌تر
کاربرد و نحوه استفاده هر کدام از ابزار ذیل را بیابید.
قیچی راست‌بر، چپ‌بر و مستقیم‌بر.

در کتاب حاضر، کلمه برش به واژه لاتین "Shear" اشاره دارد که در واقع نوعی برش مکانیکی (شکست قطعه) است که در آن براده[۲] یا ذرات سنگ‌زنی[۳] ایجاد نمی‌شود و همچنین از هیچ‌گونه فرآیند ذوب یا سوزاندنی بهره نمی‌گیرد. برای برش صفحات که دارای ضخامت بیش‌تری نسبت به ورق‌ها هستند از فرآیندهای براده‌برداری-سایشی (مانند برش با اره یا جت آب[۴]) یا ذوبی (مانند برش با اشعه لیزر، شعله گاز و یا قوس الکتریکی[۵]) استفاده می‌شود. سوراخ‌کاری در ورق‌های نازک می‌تواند با «قلم[۶] و چکش» و یا دستگاه پانچ انجام شود، اما در ورق‌های ضخیم‌تر و صفحات باید از روش براده‌برداری یعنی مته‌زنی[۷] استفاده کرد.

۲-۳. صافکاری

برای برطرف کردن تیزی لبه‌های برش یا انحنای ناخواسته آن‌ها می‌توان از سوهان[۸] یا چکش استفاده کرد. صافکاری در هر مرحله‌ای از ورق‌کاری می‌تواند انجام شود. برای صاف کردن ورق‌های نازک بهتر است از چکش‌های چوبی، پلاستیکی[۹] و یا سربی استفاده شود تا اثرات چکش روی ورق باقی نماند و ورق تاب بر ندارد.

---

1. Punching / piercing
2. Chips / swarf / filing
3. Grinding dust
4. Waterjet
5. Arc
6. Metal chisel
7. Drilling
8. Rasp
9. Mallet

۲-٤. شکل‌دهی

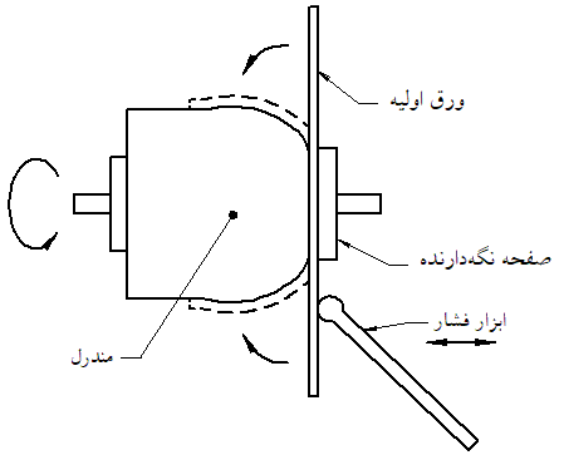
همان‌طورکه پیش از این اشاره شد، شکل‌دهی به‌معنای ایجاد تغییرشکل مومسان در فلز است. فلزات در تنش‌های کم‌تر از استحکام تسلیم دچار تغییرشکل کشسان می‌شوند، بدین معنی که بعد از باربرداری دوباره به شکل قبلی خود برمی‌گردند[1]. اما اگر تنش فراتر از استحکام تسلیم برود، ماده شروع به تغییرشکل مومسان می‌کند. این بار اگر تنش حذف شود، تنها مقدار مربوط تغییرشکل کشسان برمی‌گردد و تغییرشکل مومسان باقی خواهد ماند. بنابراین در فرآیند شکل‌دهی ابعاد ماده تغییر می‌کنند. شکل‌پذیری (یا چکش‌خواری) خاصیتی از ماده است که مشخص می‌کند آن ماده تحت تنش کششی (یا فشاری) از لحظه تسلیم تا شکست چه مقدار تغییرشکل را تجربه می‌کند. در فرآیند کشش، حتماً شکست اتفاق می‌افتد. اما در فرآیند فشار یا چکش‌کاریِ فلز، شکست دیرتر رخ می‌دهد به‌طوری‌که فلزاتی مانند طلا را می‌توان تا رساندن به ضخامت چند لایه اتمی کوبید یا فشرد. به‌عنوان مثالی دیگر؛ معمولاً آلومینیوم چکش‌خواری بالاتر و شکل‌پذیری کم‌تری نسبت به فولاد دارد.

در ورق‌کاری معمولاً از فرآیند خم‌کاری، یعنی ایجاد زاویه یا انحنا در ورق، برای تغییرشکل استفاده می‌شود. فرآیندهای دیگری مانند شکل‌دهی چرخشی[2] و کشش عمیق[3] نیز پرکاربرد هستند. در روش شکل‌دهی چرخشی، مشابه شکل ۲-٦، یک مندرل[4] شروع به چرخش می‌کند و ورق به‌کمک ابزار روی آن را می‌پوشاند. از این روش برای تولید قطعات توخالی که تقارن محوری دارند، مانند دربِ قابلمه، استفاده می‌شود. در روش کشش عمیق، مشابه شکل ۲-۷، یک ورق به‌کمک سنبه[5] به درون یک ماتریس[6] هدایت می‌شود و در اثر فشار، شکل فضای بین سنبه و ماتریس را به‌خود می‌گیرد. در این روش مساحت سطح نهایی قطعه بسیار بیش‌تر از مساحت سطح ورق اولیه (پولک) خواهد شد. از روش کشش عمیق

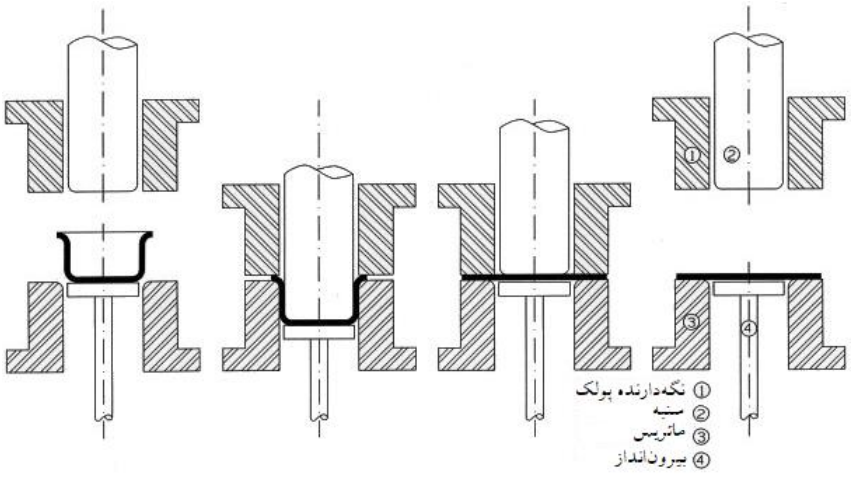
---

[1]. Springback
[2]. Metal spinning
[3]. Deep drawing
[4]. Mandrel
[5]. Punch
[6]. Die

برای تولید قوطی نوشیدنی، سینک ظرفشویی، فشنگ گلوله و بسیاری از اجزای خودرو مانند مخزن سوخت استفاده می‌شود.



شکل ۲-٦. شماتیک فرآیند شکل‌دهی چرخشی.



شکل ۲-۷. شماتیک فرآیند کشش عمیق.

در خم‌کاری[1] سطوح داخلی و خارجی ورق به‌ترتیب تحت تنش فشاری و کششی قرار می‌گیرند. بنابراین در محل خم، سطوح داخلی و خارجی به‌ترتیب دچار کاهش و ازدیاد طول می‌شوند. میزان این تغییر ابعادی به جنس و ضخامت ورق، زاویه و شعاع انحنای خم بستگی دارد. باید توجه داشت که عبور از حد شکل‌پذیری فلز باعث ایجاد ترک یا شکست به‌خصوص در سطح خارجی (طرف کششی) می‌شود. بحث دیگری که در فلزات اهمیت پیدا می‌کند «رفتار خستگی» است. شکستن اجسام در اثر خم و راست کردن مکرر آن‌ها نوعی شکست خستگی محسوب می‌گردد. لذا برای مثال اتفاق می‌افتد که در باز کردن خمِ یک آلیاژ آلومینیومی، از سطح داخلی دچار شکست می‌شود.

خم‌کاری در ساده‌ترین حالت با کمک چکش انجام می‌شود. برای این منظور می‌توان ورق را به گیره بست یا روی سندان[2] نگه‌داشت. همچنین می‌توان از انبردستی، دم‌باریک، انبرقفلی، و یا انبرهای خم‌کن[3] استفاده کرد. در تولید انبوه و یا در خم‌کاری ورق‌های عریض از ماشین‌های خم‌کاری[4] استفاده می‌شود. در این ماشین‌ها یک طرفِ ورق بین دو فک محکم می‌شود و طرف دیگر به وسیله یک تیغه تا زاویه دلخواه خم می‌شود. این ماشین‌ها به سه صورت اهرمی، پدالی و برقی موجود هستند.

در نوعی دیگر از ماشین‌های خم‌کاری از سنبه و ماتریس استفاده می‌شود. ورق به‌کمک سنبه به درون ماتریس با زاویه و شعاع مشخص هدایت می‌شود و با اعمال نیرو خم می‌شود. در این روش، برخلاف کشش عمیق، تغییرات ابعادی زیاد نیست. برای تولید استوانه‌ها و مخروط‌ها معمولاً از خم‌کن سه‌غلتکه[5] استفاده می‌شود. در این دستگاه، دو غلتک ورق را به‌سمت غلتک سوم هدایت می‌کنند. با تغییر موقعیت غلتک سوم نسبت به دو غلتک اول، می‌توان شعاع خم متفاوتی ایجاد نمود.

---

[1] . Sheet metal bending
[2] . Anvil / stake
[3] . Sheet metal bending pliers
[4] . Brake
[5] . Roll bender

گاه هدف از شکل‌دهی افزایش قوام سازه است، برای مثال شیروانی‌ها به‌همین دلیل دارای ساختار موجی‌شکل هستند. معمولاً بعد از اتمام تولید قطعه، لبه‌هایی از ورق که مستور نشده‌است برگردانده یا سیم‌گذاری[1] می‌شوند. این کار علاوه بر افزایش قوام لبه‌ها باعث برطرف شدن تیزی آن‌ها می‌شود. گاهی نیز لبه‌های ورق به‌کمک ماشین‌های مخصوص شیار می‌خورند یا چین زده‌می‌شوند؛ مشابه آنچه در لوله‌های بخاری دیده‌شود.

مطالعه بیش‌تر
کاربرد و نحوه کار ماشین خم‌کن لقمه‌ای چیست؟

۲-۵. سوار کردن[2] و اتصال

در ساده‌ترین حالت می‌توان لبه‌های دو ورق را در یک‌دیگر تا کرد (اتصال پیچک[3]) و یا از پیچ و مهره یا میخ‌پرچ استفاده نمود. برای آب‌بندی قطعه یا سازه روش‌های دیگری مانند چسب، لحیم و جوش استفاده‌می‌شود. جوشکاری مقاومتی[4] یکی از بهترین فرآیندهای جوشکاری برای اتصال ورق‌های نازک است که اصول آن در فصل بعد بیش‌تر شرح داده‌خواهد شد. با شنیدن واژه لحیم‌کاری، از میان روش‌های بسیار متنوعِ لحیم‌کاری و همچنین لحیم‌های مختلف موجود، آن‌چه بیش‌تر در ذهن عموم نقش می‌بندد لحیم‌کاری نرم با هویه[5] و لحیم قلع-سرب است. در صنایع الکترونیک معمولاً از هویه برقی با گرمایش داخلی استفاده می‌شود، اما در ورق‌کاری برای داغ کردن هویه معمولاً از چراغ، اجاق یا کوره استفاده می‌گردد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در لحیم‌کاری آن است که مذابِ لحیم به‌خوبی روی سطوح تحتِ اتصال پخش شود، و یا در اصطلاح ترکنندگی[6] خوبی داشته‌باشد.

---

[1] . Wiring
[2] . Assembling
[3] . Seam joint
[4] . Resistance Welding
[5] . Soldering iron
[6] . Wettability

آماده‌سازی سطوح به‌خصوص رفع آلودگی‌ها و اعمال روان‌ساز[1] (فلاکس یا تنه‌کار) مناسب، به افزایش ترشوندگی آن کمک می‌کند.

مطالعه بیش‌تر

۱- نحوه ایجاد و همچنین کاربرد پیچک‌های ذیل را مقایسه کنید.

ساده، پیتسبورگ و دوتایی.

۲- فرآیند ساختِ فزآینده با استفاده از ورق‌ها را شرح دهید.

۳- در شکل‌دهی ورق‌ها و به‌خصوص صفحات، گاه به جای سنبه از مواد منفجره استفاده می‌شود. در مورد این روش از شکل‌دهی تحقیق کنید.

٤- طرز کار پرچ چگونه است؟

۲-٦. نکات ایمنی

۱- بریدگی ایجادشده با لبه ورق‌ها بسیار شدید است. هنگام جابجایی و کار با ورق‌ها از دستکش و لباس‌کار مناسب استفاده نمایید.

۲- قبل از نشستن، تکیه‌دادن و یا قرار دادن اعضای بدن در هر قسمت از کارگاه، از ایمنی محل اطمینان حاصل کنید.

۳- در هیچ مرحله از کار با دستگاه‌های برش و خم‌کن نیازی به قرار دادن دست بین تیغه‌ها یا فک‌ها و یا فرو بردن آن به داخل دستگاه نیست.

٤- قبل از جابجایی اهرم‌ها، بستن چرخ فلکه یا زدن هر کلیدی، از همه افرادِ اطراف دستگاه بخواهید تا اعلام آمادگی کنند؛ چه کسانی که در حال تنظیم ورق زیر فک‌ها هستند و چه کسانی که احتمال برخورد با قسمت‌های متحرک دستگاه را دارند.

[1]. Flux

۵- در هنگام بریدن تکه‌های کوچک از ورق، مراقب پرتاب شدن آن به‌طرف چشم خود باشید.

٦- در هنگام کار با دستگاه جوش مقاومتی، از دستکش استفاده کنید. ورق تا چند سانتی‌متر اطراف نقطه جوش داغ می‌شود. در صورت بروز سوختگی در هر درجه و سطحی، بلافاصله محل سوختگی را زیر جریان آرامِ آب تمیز و ولرم بگیرید.

۷- قبل از شروع به کار از مربی بخواهید تا محل کلید قطع دستگاه، فیوزهای برق، شیر گاز، کپسول آتش‌نشانی، جعبه کمک‌های اولیه و درب خروج اضطراری را مشخص کند. درب کارگاه به‌هیچ‌عنوان نباید قفل باشد. درصورت برق‌گرفتگی یا آتش‌سوزی در اولین اقدام برق یا گاز را قطع کنید.

۸- هیچ‌گاه به‌تنهایی در کارگاه کار نکنید و درصورتی‌که با فرد مصدوم در کارگاه تنها هستید، حین نزدیک شدن و کمک به وی، با صدای بلند از دیگران تقاضای کمک کنید. مصدومیت نشان از وجود خطر دارد و ممکن است شما نیز به حادثه‌ای مشابه دچار شوید.

۲-۷. نمونه سؤال

۱- در مورد تفاوت مکانیزم برش با گیوتین و اره توضیحی مختصر بنویسید.

۲- هنگام ورق‌کاری باید زاویه خم روی ماشینِ خم‌کن کمی بیش‌تر از زاویه مورد نیاز تنظیم شود، چرا؟

۳- ورقی از جنس فولاد C20 به ضخامت ۵ mm، پهنای ۱۰ cm و طول ۲۰ cm داریم که برای آن K_b = ۰/۵ است. اگر قرار باشد با این ورق یک منشور چهار پهلوی منتظم با ارتفاع ۲۰ cm ساخته‌شود به‌طوری‌که شعاع خم‌های آن ۱۰ mm باشد، حداکثر قطر کره‌ای را که می‌تواند از درون منشور عبور کند محاسبه نمایید. فرض کنید اتصال از نوع سربه‌سر باشد.

٤- اگر دو خطِ خم در گسترشِ قطعه یک‌دیگر را قطع کنند، برای جلوگیری از اعوجاج در محل تقاطع چه باید کرد؟

۵- خم کردن ورق تا اندازه‌ای کم‌تر یا بیش‌تر از زاویه مورد نیاز چگونه می‌تواند باعث ایجاد کاهش مقاومت سازه نهایی به نیروهای خارجی شود؟

٦- کاربرد لبه‌برگردان چیست؟

۷- تفاوت پولک‌زنی و پانچ در چیست؟

۳

جوشکاری

جوشکاری و لحیم‌کاری در دسته فرآیندهای اتصال‌دهی متالورژیکی قرار می‌گیرند. در این نوع اتصال، همان‌طورکه قبل از این اشاره شد، اتم‌های موادِ تحت اتصال با یک‌دیگر پیوند شیمیایی برقرار می‌کنند. لازمه ایجاد این پیوندها آن است که اتم‌ها از دو ماده که دارای ساختار الکترونی (پیوندهای) مشابه هستند، به‌اندازه کافی به‌یک‌دیگر نزدیک شوند. اگر سطوح تحت اتصال عاری از هرگونه آلودگی چون اکسید، چربی و رطوبت باشد یا به‌روشی بتوان آن‌ها را کنار زد این شرط فراهم می‌شود. اجزای تجهیزاتی که در خلأ قرار دارند معمولاً سطح پاکی دارند و ممکن است درصورت تماس با یک‌دیگر جوش بخورند. با کمک نیروی مکانیکی می‌توان از این مکانیزم اتصال در شرایط محیطی نیز استفاده کرد، چراکه اعمال فشار باعث برطرف شدن زبری و شکسته‌شدن اکسیدهای سطحی می‌شود و در نتیجه اتم‌های بیش‌تری مجال برقراری پیوند پیدا می‌کنند. آثاری از دو هزار سال قبل وجود دارد که در آن‌ها تکه‌های طلا را با فشار به‌هم جوش داده‌اند.

در قرون وسطی از حرارت کمک گرفته‌می‌شد تا فلزات سخت‌تری مانند فولاد را به‌یک‌دیگر متصل کنند. دمای بالا باعث نرم شدن (کاهش استحکام تسلیم و افزایش شکل‌پذیری) فلز می‌شود. در اتصال موادی که ساختار الکترونی مشابه اما اتم‌های نامشابه دارند (برای مثال دو فلز متفاوت)، بهتر است که اتم‌های دو ماده کمی در یک‌دیگر نفوذ[1] کنند تا فصل مشترک آن‌ها به‌صورت تدریجی از یک ماده به ماده دیگر تغییر کند. بنابراین، گاه

[1]. Diffusion

فرآیند اتصال با نگه‌داری در دمای بالا و تحت نیروی مکانیکی به‌مدت طولانی انجام می‌شود تا اتم‌ها فرصتِ نفوذدرهم[1] را داشته‌باشند. تا این‌جای کار، تمام فرآیندها در دسته «جوشکاری حالت جامد» قرار می‌گیرند.

مطالعه بیش‌تر

در هر کدام از فرآیندهای جوشکاری حالت جامد که در ذیل آمده‌است، منبع انرژی، منبع حرارت و نحوه اعمال نیروی مکانیکی و همچنین نحوه محافظت از جوش را بیابید.

جوشکاری فشاری گرم، جوشکاری پتکه‌ای یا آهنگری، جوشکاری غلتکی، جوشکاری هم‌فشارکاری، جوشکاری نفوذی، جوشکاری القایی، جوشکاری مقاومتی سربه‌سر، جوشکاری مقاومتی نواری، جوشکاری گاز پرفشار، جوشکاری انفجاری، جوشکاری اصطکاکی، جوشکاری اصطکاکی تلاطمی، جوشکاری اصطکاکی خطی، جوشکاری فراصوتی، جوشکاری فشاری سرد، و اتصال با فاز مایع گذرا*.

* فرآیند اتصال با فاز مایع گذرا معمولاً در دسته فرآیندهای لحیم‌کاری سخت قرار می‌گیرد.

در فرآیندهای جوشکاری ذوبی، حرارت می‌تواند با ذوبِ مواد و امتزاج آن‌ها شرایط اتصال متالورژیکی را فراهم آورد. معمولاً این فرآیندها بر اساس روش حرارت‌دهی دسته‌بندی می‌شوند که می‌تواند قوس الکتریکی، مقاومت الکتریکی[2]، تابشی[3]، هدایت حرارتی[4]، القا[5] و یا واکنش شیمیایی[6] باشد. شایان ذکر است که از اصطکاک نیز می‌توان حرارت تولید کرد که در حال حاضر تنها در فرآیندهای جوشکاری حالت جامد کاربرد دارد. جوشکاری‌های ذوبی را

---

[1] . Interdiffusion
[2] . Electrical resistance
[3] . Radiation
[4] . Thermal conduction
[5] . Induction
[6] . Chemical reaction

می‌توان از نظر پرکننده نیز دسته‌بندی کرد؛ ۱) بدون استفاده از پرکننده[1]، ۲) با پرکننده هم‌جنس با فلز پایه[2] و ۳) با پرکننده‌ای که ترکیب شیمیایی متفاوت از فلز پایه دارد[3].

مطالعه بیش‌تر

در هر کدام از فرآیندهای جوشکاری ذوبی که در ذیل آمده‌است، منبع انرژی، منبع حرارت و نحوه محافظت از جوش را بیابید.

جوشکاری الکترود تنگستنی با گاز محافظ، جوشکاری الکترود مصرفی با گاز محافظ، جوشکاری قوس پلاسما، جوشکاری الکتروگازی، جوشکاری هیدروژن اتمی، جوشکاری قوسی کربنی، جوشکاری قوسی با الکترود بدون‌پوشش، جوشکاری زیرپودری، جوشکاری قوسی توپودری، جوشکاری جرقه‌ای، جوشکاری زائده‌ای، جوشکاری تصادمی الکتریکی، جوشکاری سرباره الکتریکی، جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، جوشکاری مقاومتی نواری، جوشکاری مقاومتی با بسامد بالا، جوشکاری پیش‌طرحی، جوشکاری پرتو الکترونی، جوشکاری لیزر، جوشکاری گدازی، جوشکاری القایی، جوشکاری اکسی‌استیلن، جوشکاری اکسی‌هیدروژن، جوشکاری هوا استیلن، جوشکاری ترمیت یا احتراقی.

با افزایش دما واکنش اکسیده‌شدن فلزات سرعت می‌گیرد، لذا باید به‌طریقی از رسیدن اکسیژن به مناطق داغ جلوگیری کرد. با انجام جوشکاری در خلأ یا با دمش گاز محافظ به منطقه جوش می‌توان میزان اکسیژن در دسترس را کاهش داد. در روشی دیگر می‌توان با ایجاد لایه‌ای محافظ روی مذاب یا طراحی مناسب فرآیند از نفوذ اکسیژن به مذاب جلوگیری کرد. در بعضی فرآیندهای جوشکاری، تمرکز حرارتی به‌حدی بالاست که مذاب قبل از اکسیده‌شدن منجمد و سرد می‌شود و نیازی به محافظت نیست.

---

[1]. Autogenous welding
[2]. Homogeneous welding
[3]. Heterogeneous welding

مطالعه بیش‌تر
در مورد سه اصطلاح رایج ذیل بحث نمایید.
الف- جوش آرگون، ب- جوش CO_2، ج- زردجوش.

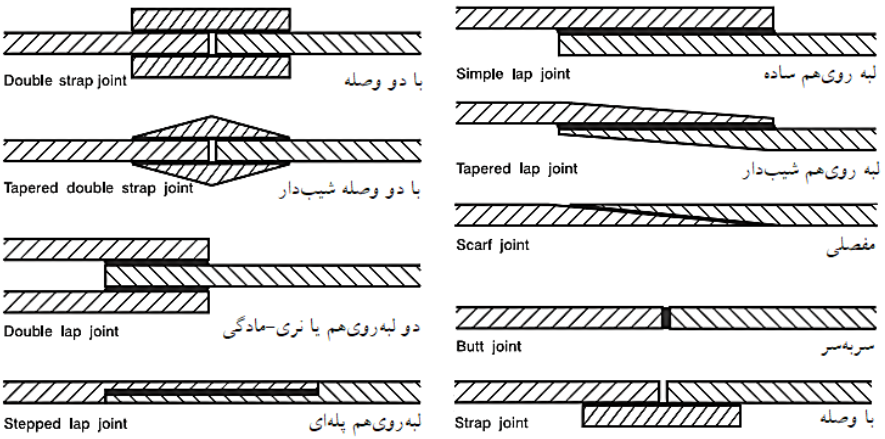
۳-۱. طرح اتصال

شکل لبه مواد تحتِ اتصال و همچنین نحوه قرارگیری این لبه‌ها در کنار یکدیگر قبل از شروع فرآیند اهمیت زیادی دارد. مهم‌ترین چالش در طراحی اتصال در لحیم‌کاری مشابه چسب‌کاری، ایجاد سطح تماس کافی با توجه به نوع و اندازه نیروهای خارجی است. شکل ۳-۱ تعدادی از طرح‌های اتصال در لحیم‌کاری را نشان می‌دهد. برای لحیم‌کاری ورق‌های نازک، می‌توان دو لبه را روی هم قرار داد. با افزایش ضخامت می‌توان شکل لبه‌ها را تغییر داد و یا از نوار وصله[1] استفاده کرد. لبه‌ها می‌توانند به‌صورت شیب‌دار[2]، پله‌ای[3] و یا نری-مادگی[4] در هم جا بخورند. نوار وصله نیز باعث تقویت اتصال به‌خصوص در برابر نیروهای خمشی می‌شود. در ضخامت‌های بالا، اتصال سربه‌سر نیز مناسب است. گاهی ممکن است از اتصال مکانیکی نیز کمک گرفته‌شود؛ مشابه آن‌چه در لحیم‌کاری سیم انجام می‌شود که قبل از اعمال لحیم، دو سر سیم در هم تنیده می‌شوند.

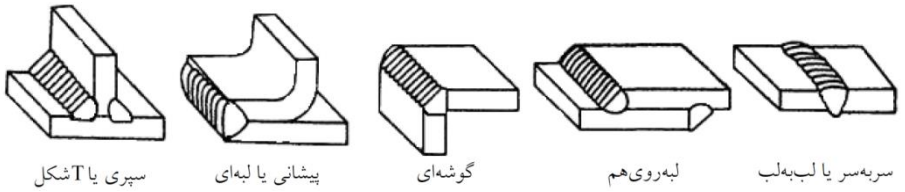
شکل ۳-۲ پنج طرح اتصالِ معمول در جوشکاری را نشان می‌دهد. در طرح‌های سربه‌سر و پیشانی[5] معمولاً از «جوش شیاری[6]»، و در طرح‌های لبه‌روی‌هم، گوشه‌ای[7] و سپری[8] اغلب از «جوش نبشی[9]» (گوشه یا گلویی) استفاده می‌شود.

---

[1]. Strap
[2]. Tapered
[3]. Stepped
[4]. Male and Female
[5]. Edge joint
[6]. Groove weld
[7]. Corner joint
[8]. Tee joint
[9]. Fillet weld



شکل ۳-۱. چند نوع طرح اتصال در لحیم‌کاری. ناحیه سیاه‌رنگ لحیم را نشان می‌دهد.

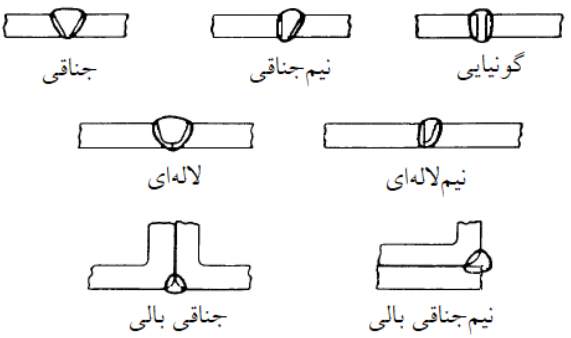


شکل ۳-۲. انواع طرح اتصال معمول در جوشکاری.

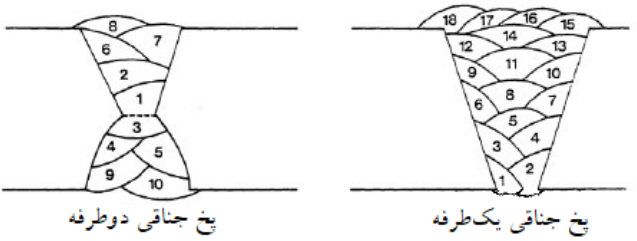
لبه‌های تحت اتصال در شکل ۳-۲ به‌صورت گونیایی هستند. برای سهولت در جوشکاری، بهبود استحکام اتصال و همچنین کاهش اعوجاج قطعه می‌توان شکل لبه‌ها را تغییر داد، و یا در اصطلاح از پخ[1] استفاده کرد. شکل ۳-۳ انواع پخ یک‌طرفه جوش شیاری را نشان می‌دهد که البته برای جوش نبشی نیز قابل اجرا هستند. پخ کمک می‌کند تا منبع حرارت به عمق بیش‌تری از فلز نفوذ کند. پخ لاله‌ای[2] (Uشکل) نسبت به پخ جناقی[3] (Vشکل) میزان هدررفت فلز و مصرف الکترود را کاهش می‌دهد، اما ایجاد این پخ مشکل‌تر است. بعضی از

[1] . Bevel
[2] . U groove weld
[3] . V groove weld

پخ‌ها مانند پخ جناقی بالی نیاز به سنگ‌زنی (براده‌برداری) ندارند و به‌صورت طبیعی در قطعه وجود دارند.



شکل ۳-۳. انواع پخ یک‌طرفه در جوش شیاری.



شکل ۳-٤. توالی پاسه‌های جوشکاری در پخ یک‌طرفه و دوطرفه.

پخ درصورت نیاز می‌تواند دوطرفه باشد، برای مثال پخ‌های دوطرفه نیم‌جناقی[1] و جناقی به‌ترتیب به‌شکل K و X خواهند شد. در قطعات ضخیم گاه باید چندین خط روی هم جوش داده‌شود تا درز اتصال پر گردد. به هر یک از این خطوطِ جوش، یک پاسه[2] گفته‌می‌شود. در جوشکاری‌های چندپاسه می‌توان از پخ دو طرفه استفاده کرد و پاسه‌های جوش را یکی‌درمیان در بالا و پایین زد. همان‌طورکه شکل ۳-٤ نشان می‌دهد، این روش تعداد پاسه‌های موردنیاز را

[1] . Bevel groove weld
[2] . Weld pass

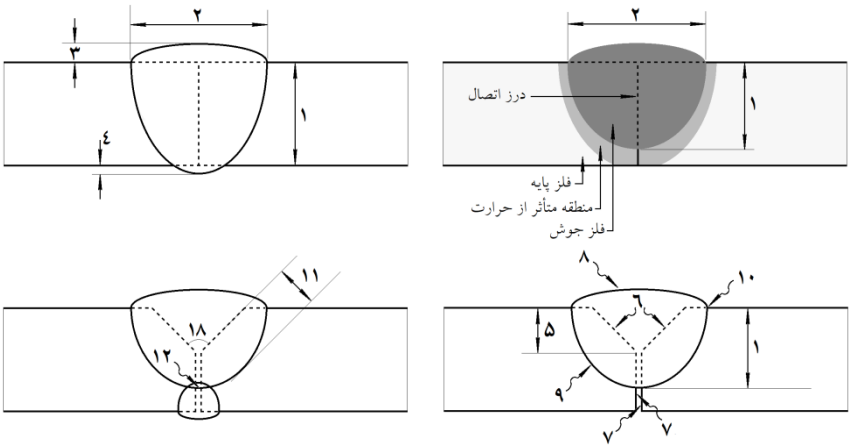
کاهش می‌دهد. همچنین حین جوشکاری، تنش‌های ایجادشده توسط هر پاسه، با پاسه طرف مقابل خنثی شده و از میزان اعوجاج نهایی کاسته می‌شود.

۳-۲. هندسه جوش

یک جوشکار مبتدی معمولاً با بررسی ظاهرِ جوش تنها به حضور عیوبی مانند سوختگی کنار جوش[1]، پرنشدگی درز اتصال، ذوب اضافی، پهنای زیاد یا کم، پاشش زیاد و آخال‌ها و تخلخل‌های نمایان در سطح جوش پی می‌برد. اما عیوب و هندسه جوش در اعماق فلز نیز اهمیت ویژه‌ای در تعیین سلامت و تخمین استحکام آن دارد. شکل **۳-۵** هندسه یا پروفیل جوش شیاری را نشان می‌دهد. بخشی از فلز پایه (BM[2]) که در اثر حرارت ورودی به‌طور کامل ذوب می‌شود را فلز جوش (WM[3]) می‌نامند. انتقال حرارت باعث افزایش دمای مناطق دیگری از فلز پایه نیز می‌شود. این حرارت در منطقه‌ای مجاور فصل مشترک جوش (شماره ۹) آن‌قدر زیاد است که می‌تواند دانه‌بندی و ریزساختار فلز پایه را تغییر دهد و یا حتی موجب ذوب جزئی آن شود. به همین دلیل به این منطقه که از نقطه ذوب عبور نمی‌کند اما تحت تأثیر حرارت قرار می‌گیرد، منطقه متأثر از حرارت (HAZ[4]) گفته‌می‌شود. یکی از تأثیرات شایعِ حرارت در HAZ رشد دانه است که باعث افت خواص مکانیکی در این منطقه می‌شود. برای مثال قطعاتی که با روش جوشکاری زیرپودری (SAW) جوش داده‌می‌شوند مستعدِ شکست در HAZ هستند، چراکه حرارت ورودی در این روش بسیار بالا است و می‌تواند یک HAZ وسیع با دانه‌های درشت ایجاد کند. در بخشی از HAZ که دچار ذوب جزئی می‌شود (PMZ[5])، تنها فازهایِ با نقطه ذوب پایین استحاله ذوب را تجربه می‌کنند.

---

[1]. Undercutting
[2]. Base Metal
[3]. Weld Metal
[4]. Heat-Affected Zone
[5]. Partially Melted Zone



شکل ۳-۵. شماتیکی از سطح مقطع جوش شیاری.

پدیده ترد شدن (خشکه شدن) فولادهای پرکربن نیز مثالی دیگر از تغییرات ریزساختاری است. این فولادها مستعد تشکیل ریزساختارِ سخت و تردِ مارتنزیت هستند. افزایش سرعت سرد شدن باعث تشکیل مقدار قابل توجهی مارتنزیت در WM و HAZ می‌شود و قطعه نهایی را ترد و شکننده می‌نماید. بنابراین پیشنهاد می‌شود که بعد از جوشکاری از سرد کردن این فولادها در آب خودداری گردد.

بازرسِ جوش و جوشکارِ با تجربه می‌توانند با بررسی چشمی به وضعیت جوش در اعماق قطعه پی ببرند. بررسی پارامترهای فرآیند (مانند جریان الکتریکی و فشار گاز)، روند جوشکاری (مانند طول قوس و ظاهر شعله) و ظاهر جوش نهایی (مانند نظم هم‌پوشانی قطرات منجمدشده) می‌تواند تا حدودی به آن‌ها کمک کند. برای ارزیابی می‌توان از آزمون‌های غیرمخرب[1] مانند روش رادیوگرافی (RT[2]) و روش فراصوتی (UT[3]) نیز استفاده کرد. اما برای تهیه تصاویری مشابه شکل ۳-۵ باید سطح مقطع جوش پولیش و حکاری[4] شود.

[1] . Nondestructive testing (NDT)
[2] . Radiographic Testing
[3] . Ultrasonic Testing
[4] . Etching

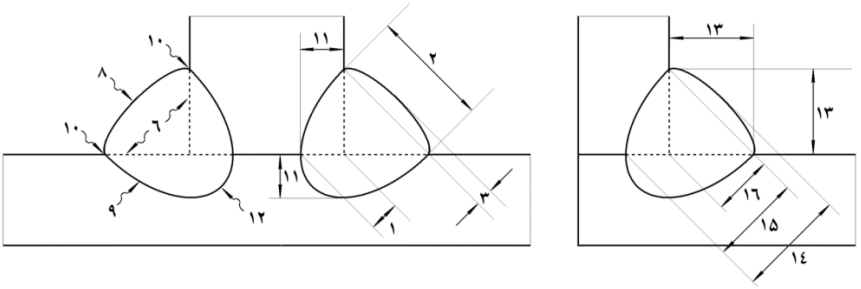
در این روش ابتدا نمونه برش می‌خورد، سپس سطحِ برش‌خورده با کمک سنباده و نمدهای پولیش صیقلی می‌گردد، و در نهایت در اسیدهای رقیق‌شده حکاری یا در اصطلاح «اچ» می‌شود. حکاری باعث می‌شود که فصل مشترک‌های بین WM، HAZ و BM نمایان‌تر شوند.

ابعادِ فلز جوش (WM) نقشی تعیین‌کننده در میزان استحکام جوش دارند. عمق جوش[۱] (اندازه ۱) مشخص می‌کند که هر پاسه جوش چه عمقی از درز اتصال را پر می‌کند. هر چه عمق جوش کم‌تر باشد، سطح مؤثرِ تحملِ بار کاهش می‌یابد و در نتیجه جوش تنش‌های کم‌تری را می‌تواند تحمل کند. علاوه بر این، پر کردن ناقص درز اتصال باعث ایجاد محل‌های تمرکز تنش می‌شود که نتیجه آن کاهش مقاومت قطعه به‌خصوص در برابر تنش‌های خمشی است. به‌عنوان مثالی دیگر، هرچه نسبت ارتفاع گرده جوش[۲] (اندازه ۳) به پهنای جوش[۳] (اندازه ۲) بیش‌تر شود، پنجه جوش[۴] (شماره ۱۰) تیزتر خواهد شد و در نتیجه تمرکز تنش در آن افزایش می‌یابد.

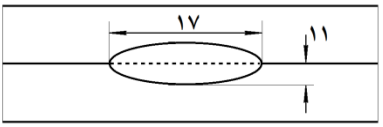
شکل ۳-۶ و شکل ۳-۷ ابعاد مهم فلز جوش را در جوش نبشی و جوش ناشی از جوشکاری مقاومتی نشان می‌دهند. اندازه جوش[۵] مهم‌ترین بعدِ فلز جوش است که از آن در محاسبات طراحی جوش استفاده می‌شود. برای جوش شیاری، نبشی و مقاومتی به‌ترتیب عمق جوش (اندازه ۱)، ساق جوش[۶] (اندازه ۱۳) و قطر دکمه جوش[۷] (اندازه ۱۷) را به‌عنوان اندازه جوش در نظر می‌گیرند. برای مثال اگر میزان نیروی وارده حین کار (F) و همچنین استحکام جوش (σ) مشخص باشد، می‌توان با تقسیم نیرو بر استحکام، سطح جوش مورد نیاز را به‌دست آورد ($A_{total} = F/\sigma$). حال باتوجه به قطر دکمه جوش (d_{nugget})، مساحت مؤثر هر دکمه جوش به‌دست می‌آید ($A_{nugget} = \pi d^2/4$). با تقسیم سطح جوش مورد نیاز بر مساحت مؤثر هر دکمه جوش، می‌توان تعداد دکمه جوش مورد نیاز را به‌دست آورد.

---

[1] . Weld depth
[2] . Reinforcement
[3] . Weld width
[4] . Weld toe
[5] . Weld size
[6] . Weld leg
[7] . Weld nugget



شکل ۳-٦. شماتیکی از سطح مقطع جوش نبشی.



شکل ۳-۷. شماتیکی از سطح مقطع جوش حاصل از فرآیند جوشکاری مقاومتی.

مطالعه بیش‌تر

در مورد اهمیت هر یک از ابعاد جوش بحث نمایید.

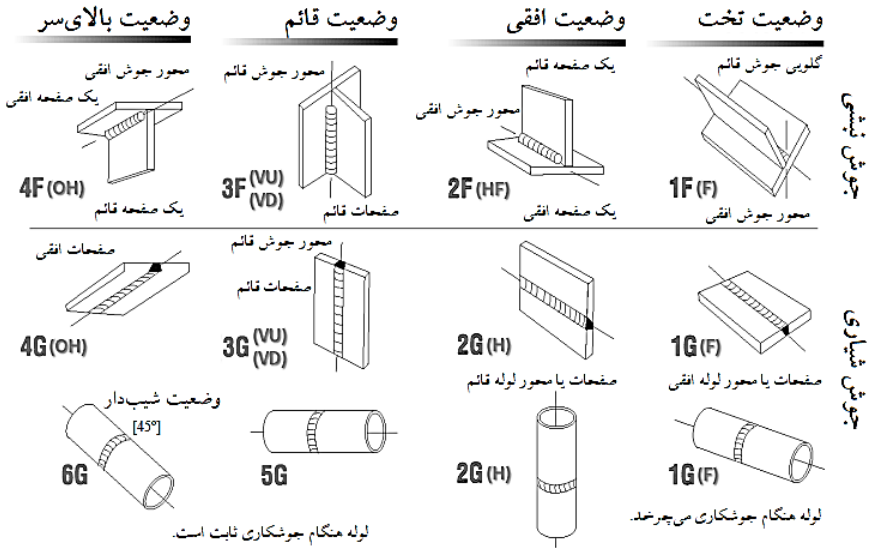
۱- عمق جوش، ۲- پهنای جوش، ۳- ارتفاع گرده جوش، ٤- نفوذ اضافه در ریشه جوش، ٥- عمق پخ، ٦- سطح یا رویه ذوب/پخ، ۷- پاشنه پخ، ۸- سطح یا رویه جوش، ۹- فصل مشترک جوش، ۱۰- پنجه جوش، ۱۱- عمق ذوب، ۱۲- ریشه جوش، ۱۳- ساق جوش، ١٤- گلوگاه یا گلویی جوش واقعی، ۱٥- گلوگاه جوش مؤثر، ١٦- گلوگاه جوش نظری، ۱۷- قطر دکمه جوش یا پهنای نوار جوش و ۱۸- زاویه پخ.

مطالعه بیش‌تر

روابط لازم برای محاسبه اندازه مناسبِ جوشِ شیاری و نبشی در سازه‌های مختلف را بیابید.

۳-۳. وضعیت جوشکاری[1]

وضعیت جوشکاری در واقع نحوه قرارگیری خط جوش و قطعه را مشخص می‌کند که یک عامل تعیین‌کننده در انتخاب جوشکار، نوع فرآیند جوشکاری و پارامترها و نحوه انجام آن فرآیند است. شکل ۳-۸ انواع وضعیت‌های جوشکاری را به‌همراه کد مربوطه در استاندارد AWS[2] یا ASME[3] نشان می‌دهد. ساده‌ترین جوشکاری در وضعیت تخت[4] (1F و 1G) انجام می‌شود که گرانش زمین در جهت انتقال مذاب به درز اتصال است. بنابراین تا حد ممکن جوشکاری در وضعیت تخت انجام می‌شود. برای مثال در جوشکاری لوله‌ها می‌توان تجهیزات جوشکاری را روی لوله ثابت نگه داشت و لوله را متناسب با سرعت جوشکاری چرخاند.



شکل ۳-۸. وضعیت‌های مختلف جوشکاری.

[1] . Welding position
[2] . American Welding Society
[3] . American Society of Mechanical Engineers
[4] . Flat

در وضعیت افقی[1] (2F و 2G) نیز خط جوش افقی است اما نیروی گرانش زمین عمود بر درز اتصال وارد می‌شود. جوشکار در این وضعیت باید از شره کردن مذاب جلوگیری کند، در غیر این‌صورت فرورفتگی‌هایی در پنجه بالایی جوش باقی می‌ماند که در اصطلاح به آن سوختگی کنار جوش گفته‌می‌شود. جوشکاری در وضعیت قائم[2] (3F و 3G) باید رو به بالا (VU[3]) یا رو به پایین (VD[4]) انجام شود. برای مثال در جوشکاری رو به بالا باید از شره کردن و تلنبار شدن قطرات مذاب روی یک‌دیگر جلوگیری کرد. در وضعیت بالای سر[5] (3F و 3G) قطرات مذاب با حرکت در جهت عکس گرانش زمین در درز اتصال قرار می‌گیرند. وضعیت 5G و 6G نیز مخلوطی از همه وضعیت‌ها هستند که در آن لوله (به‌ترتیب) به‌صورت افقی و با زاویه ٤٥ درجه نسبت به زمین ثابت است و جوشکار حین جوشکاری به دور آن می‌چرخد.

جوشکار حرفه‌ای با تنظیم زاویه و سرعت حرکت الکترود (یا شعله) از نیروی قوس (یا فشار گاز) بهره می‌برد تا قطرات مذاب را به طرف درز اتصال هدایت کند. کشش سطحی[6] فلز مذاب و جامد و همچنین نیروهای قوس از ریزش مذاب قبل از انجماد جلوگیری می‌کنند. انجماد در جوشکاری در کسری از ثانیه اتفاق می‌افتد چراکه اولاً حجم مذاب کم است و دوماً مذاب در تماس مستقیم با فلز است که مکش حرارتی بالایی دارد. زوایا و سرعت‌های مطلوب بسته به فرآیند و پارامترهای انتخاب‌شده تغییر می‌کنند، به‌طوری‌که تنها یک جوشکارِ باتجربه می‌تواند در وضعیت‌های غیرتخت، جوش سالم ایجاد کند.

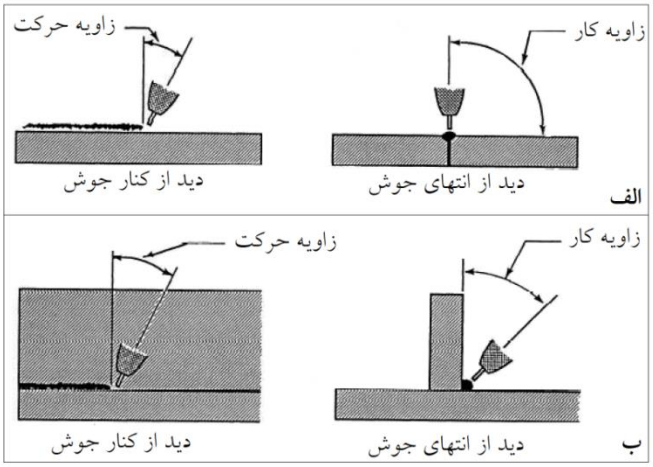
٣-٤. روش جوشکاری

نحوه قرارگیری الکترود یا مشعل روی قطعه کار را می‌توان با دو زاویه مشخص کرد؛ زاویه کار[7] و زاویه حرکت[1]، که هردو نقشی تعیین‌کننده در میزان کیفیت جوش دارند. شکل

---

1. Horizontal
2. Vertical
3. Vertical Up
4. Vertical Down
5. Overhead
6. Surface tension
7. Work angle

۳-۹ این زوایا را برای دو جوش شیاری و نبشی نشان می‌دهد. اگر از ابتدا یا انتهای خط جوش به آن نگاه بیاندازیم، سطح مقطع عمود بر خط جوش را خواهیم دید. در این صفحه می‌توان زاویه کار را مشخص کرد. درصورتی‌که از بغل به خط جوش نگاه کنیم، صفحه‌ای مقابل ما خواهد بود که خط قائم و خط جوش در آن قرار دارند. فارغ از فضای سه‌بعدی، زاویه‌ای که در این صفحه بین الکترود و محور قائم ایجاد می‌شود را زاویه حرکت می‌گویند.

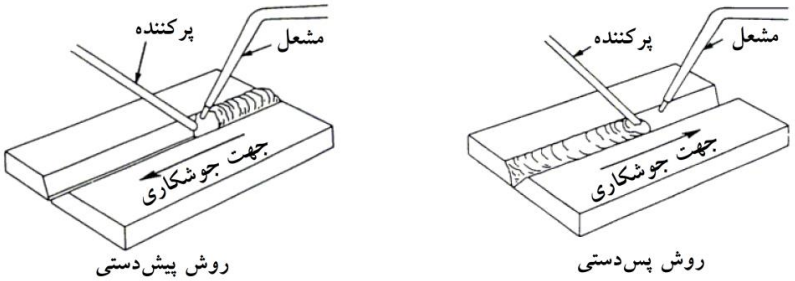


شکل ۳-۹. زوایای کار و حرکت در جوش الف) شیاری و ب) نبشی.

در بدو آموزش به جوشکاران مبتدی پیشنهاد می‌شود که زوایای کار و حرکت در جوش شیاری به‌ترتیب ۹۰ درجه و ۴۵ درجه و در جوش نبشی به‌ترتیب ۴۵ درجه و صفر درجه باشد. زاویه حرکت با توجه به ضخامت قطعه کار، پارامترهای فرآیند جوشکاری، حرکات دست جوشکار و وضعیت جوشکاری تغییر می‌کند. زاویه کار نیز در وضعیت جوشکاریِ غیرتخت و یا زمانی که دو فلزِ تحت اتصال از نظر جنس یا ضخامت تفاوت دارند ممکن است تغییر کند. برای مثال پیشنهاد می‌شود که الکترود کمی مایل به طرف فلز ضخیم‌تر

[1] . Travel angle

گرفته‌شود، چرا که مکش حرارتی از طرف آن بیش‌تر است و نیاز به حرارت‌دهی بیش‌تری دارد.



شکل ۳-۱۰. روش‌های پس‌دستی و پیش‌دستی در جوشکاری اکسی‌استیلن.

مشابه شکل ۳-۱۰، الکترود یا مشعل را می‌توان به دو روش در راستای درز اتصال حرکت داد؛ ۱- روش پس‌دستی[1] یا حرکت به طرف راست[2] و ۲- روش پیش‌دستی[3] یا حرکت به‌طرف چپ[4]. در نام‌گذاری معمولاً فرض می‌شود که جوشکار راست‌دست است. در روش پس‌دستی امتداد قوس یا شعله روی جوش رسوب‌داده‌شده است، درنتیجه سرعت سرد شدن جوش کم‌تر، محافظت بهتر و عمق جوش بیش‌تر است. هرچه «زاویه حرکت در روش پس‌دستی[5]» بیش‌تر باشد، عمق جوش بیش‌تر است. در این کارگاه برای جوشکاری با فرآیندِ SMAW[6] روش پس‌دستی آموزش داده‌می‌شود. در روش پیش‌دستی امتداد شعله در جهت تکمیل جوش و در امتداد مسیر جوشکاری است، بنابراین فلز قبل از ذوب گرم شده و آلودگی‌های روی آن برطرف می‌شود. کنترل پرکننده در این روش آسان‌تر است؛ گاه حتی نیازی به حرکت دادن پرکننده نیست و تنها مشعل به‌سمت آن حرکت می‌کند. به‌همین دلیل در این کارگاه از روش پیش‌دستی در فرآیند جوشکاری اکسی‌استیلن استفاده‌می‌گردد. هرچه

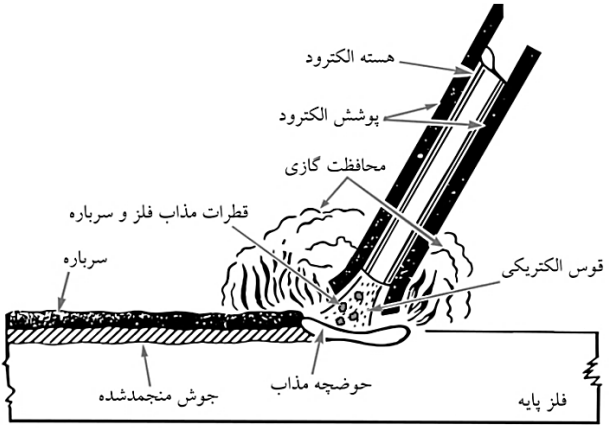
---

[1] . Backhand welding technique
[2] . Rightward technique
[3] . Forehand welding technique
[4] . Leftward technique
[5] . Trailing/drag angle
[6] . Shielded Metal Arc Welding

«زاویه حرکت در روش پیش‌دستی [1]» بیش‌تر باشد، عمق جوش کم‌تر است. شایان ذکر است که زوایای مذکور در روش پیش‌دستی و پس‌دستی در محدوده صفر درجه (عمود بر سطح قطعه‌کار) تا حدود ۷۰° تغییر می‌کنند.

۳-۵. جوشکاری قوسی با الکترود پوشش‌دار (SMAW)

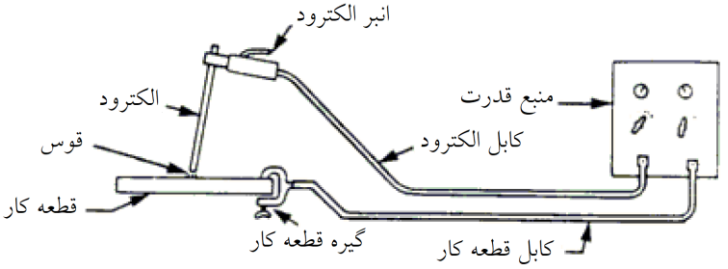
جوشکاری قوسی با الکترود پوشش‌دار، که در ایران با نام «جوش الکترود دستی[2]» یا «جوش برق» نیز شناخته‌می‌شود، نوعی فرآیند جوشکاری ذوبی است که از قوس الکتریکی به‌عنوان منبع حرارت بهره می‌برد. این فرآیند سهم زیادی در جوشکاری سازه‌ها دارد چراکه ساده، ارزان، کم‌خطر، قابل حمل و در دسترس است. مشابه شکل ۳-۱۱، قوس بین قطعه‌کار و یک الکترود برقرار می‌شود که به قطب‌های مخالف وصل شده‌اند. این فرآیند از نوع الکترود مصرفی است، بدین‌معنی که الکترود حین جوشکاری ذوب و وارد حوضچه جوش[3] می‌شود. حوضچه جوش یا حوضچه مذاب ناحیه‌ای کوچک روی سطح قطعه کار و زیر الکترود است که هنگام برقراری قوس ذوب می‌شود.



شکل ۳-۱۱. شماتیکی از فرآیند جوش با روش SMAW.

[1] . Leading/push angle
[2] . Manual metal arc welding (MMA) or stick welding
[3] . Melt/weld pool

محافظت از جوش به‌کمک روان‌سازی انجام می‌شود که روی الکترود پوشش داده‌شده‌است. روان‌ساز هنگام جوشکاری ذوب شده و روی مذاب قرار می‌گیرد که در این حالت به آن سرباره[1] (شلاکه یا گل جوش) گفته‌می‌شود. سرباره بعد از سرد شدنِ جوش از روی آن حذف می‌شود. همچنین، پوشش می‌تواند ایجاد دود کند و به این روش اکسیژن محیط را از اطراف قوس پس بزند. شکل ۳-۱۲ تجهیزات این فرآیند را نشان می‌دهد که شامل منبع قدرت، کابل‌ها، انبر جوش و الکترود است. در این کارگاه از عینک و چکش برای حذف سرباره، از دستکش، پیش‌بند و ماسک برای محافظت در برابر تشعشعات و پاشش قطرات مذاب و از انبری مخصوص برای جابجایی قطعه داغ استفاده‌می‌شود.



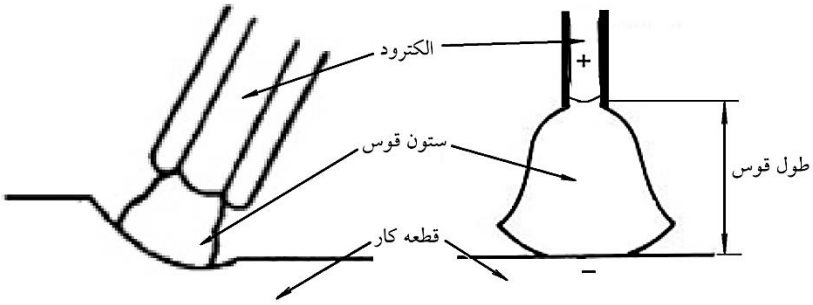
شکل ۳-۱۲. تجهیزات فرآیند جوشکاری SMAW.

۳-۵-۱. قوس الکتریکی

به تخلیه بار الکتریکی بین دو قطب از طریق کانال یونیزه‌شده قوس الکتریکی گفته‌می‌شود. یونیزاسیون[2] فرآیندِ جدا کردن یا اضافه کردن الکترون از یک اتم، مولکول یا ترکیب و تبدیل آن به یون است. برای ایجاد این کانال یونیزه باید دما یا اختلاف پتانسیل الکتریکی (ولتاژ) به‌اندازه کافی بالا باشد. نزدیک‌ترین فاصله بین دو قطب را می‌توان طول قوس[3] در نظر گرفت. هرچه طول قوس کم‌تر باشد، میزان دما و ولتاژ مورد نیاز کم‌تر خواهد

[1] . Slag
[2] . Ionization / ionisation
[3] . Arc length

بود. همان‌طور که شکل ۳-۱۳ نشان می‌دهد، قوس الکتریکی ظاهری زنگوله‌ای‌شکل یا مخروطی‌شکل دارد.



شکل ۳-۱۳. شماتیکی از ظاهر قوس الکتریکی در جوشکاری SMAW.

برای شروع قوس (ایجاد گاز یونیزه) از دو روش استفاده می‌شود؛

۱- تماسی: در این روش نوک الکترود با سطح قطعه کار تماس داده‌می‌شود. با ایجاد اتصال کوتاه، جریان الکتریکی برقرار می‌شود. به‌علتِ آلودگی و فاصله هوایی و در نتیجه مقاومت الکتریکیِ بالای موجود بین الکترود و قطعه کار، حرارت زیادی تولید می‌شود. این حرارت می‌تواند انرژی لازم برای جدا کردن الکترون از اتم (تابع کار[1]) را تأمین کند و در نتیجه قوس برقرار شود. به‌محض ایجاد قوس، الکترود عقب می‌رود تا جریان الکتریکی از طریق قوس ادامه یابد.

۲- بسامد بالا: می‌توان از مکانیزم ایجاد رعد و برق یعنی ایجاد اختلاف پتانسیل بسیار بالا استفاده کرد. اما ولتاژ بالا در جوشکاری خطر برق‌گرفتگی را افزایش می‌دهد. بنابراین ولتاژ بالا (حدود 10^4 V) به‌صورت پالسی (لحظه‌ای) اعمال می‌شود. ولتاژ بالا باعث کاهش تابع کار شده و درنتیجه قوس راحت‌تر ایجاد می‌شود. به‌محض ایجاد قوس، ولتاژ کاهش یافته و شدت جریان افزایش می‌یابد. هنگام استفاده از

[1]. Work function

الکترود تنگستنی (در روش TIG)، که تماس آن به سطح قطعه کار مجاز نیست، از این روش استفاده می‌شود.

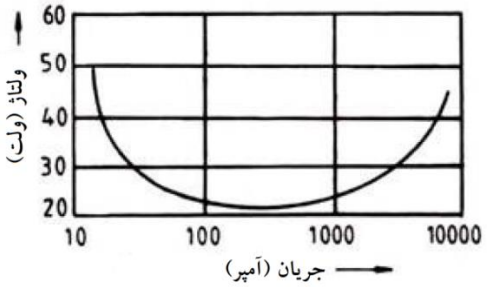
مطالعه بیش‌تر
۱- چرا قبل از شروع جوشکاری، الکترود روی مکانی دیگر در اصطلاح «گرم» می‌شود؟
۲- علت چسبیدن الکترود به سطح قطعه کار حین روشن کردن قوس به‌روش تماسی چیست؟

مشابه آن‌چه در سیم حامل جریان الکتریکی اتفاق می‌افتد، جریان الکترون‌ها و یون‌ها به‌طرف قطب ناهمنام در طول قوس نیز تولید حرارت می‌کند. جدا کردن و اضافه کردن الکترون به‌ترتیب گرماگیر[1] و گرماده[2] است. انرژی آزادشده در اثر اضافه کردن الکترون به اتم یا تبدیل کاتیون به اتم خنثی معمولاً به‌صورت فوتون‌های پرانرژی است که می‌تواند به بافت زنده آسیب بزند. بنابراین حین کار با قوس، رعایت فاصله و استفاده از ماسک‌های جاذبِ پرتوهای پرانرژی ضروری است. مجموع حرارت‌های ایجادشده به ادامه فرآیند یونیزاسیون کمک می‌کند و قوس برقرار می‌ماند. حرارت تولیدشده دمای قوس را تا چند هزار درجه سانتی‌گراد بالا می‌برد که به‌راحتی می‌تواند هر فلزی را ذوب کند.

برای آن‌که قوس برقرار بماند، باید ولتاژ و جریان قوس رابطه مشخصی باهم داشته‌باشند. این رابطه به‌عنوان مشخصه ولت-آمپر[3] ایستای قوس شناخته‌می‌شود و منحنی عمومی آن در شکل ۳-۱٤ نشان داده‌شده‌است. همان‌طورکه در این شکل مشاهده‌می‌شود، با افزایش جریان از صفر تا A ۱۰۰ ولتاژ قوس کاهش می‌یابد. با افزایش جریان قوس در این محدوده، دما به‌تدریج افزایش می‌یابد و فرآیند یونیزاسیون راحت‌تر انجام می‌شود. به این

[1] . Endothermic
[2] . Exothermic
[3] . Volt-ampere characteristic

ترتیب، کاهش مقاومت الکتریکیِ کانال یونیزه‌شده بر «اثر افزایش جریان» غلبه می‌کند و ولتاژ دو سر قوس کاهش می‌یابد (قانون اهم: $V = RI$). مشخصه ولت-آمپر در محدوده ۱۰۰ A تا ۱۰۰۰ A تقریباً تخت است. در واقع با افزایش جریان در این محدوده، قوس به‌تدریج قطورتر می‌شود و در نتیجه چگالی جریان تقریباً ثابت می‌ماند. اگر قوس الکتریکی به سیم حامل جریان تشبیه شود؛ گویی قطر سیم در حال افزایش است و مقاومت الکتریکی آن کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که مقدار $R \times I$ و در نتیجه V ثابت می‌ماند. اما انبساط قوس در جریان‌های فراتر از ۱۰۰۰ A کند می‌شود و چگالی جریان افزایش می‌یابد. بنابراین ولتاژ قوس با افزایش جریان در بالاتر از ۱۰۰۰ A افزایش می‌یابد. اعداد ذکرشده برای محدوده جریان ممکن است در شرایط مختلف، متفاوت باشند.



شکل ۳-۱۴. مشخصه جریان-ولتاژ یک قوس الکتریکی در یک طول قوس ثابت.

برقرار بودن قوس برای جوشکاری کافی نیست، بلکه قوس ایجادشده باید در اصطلاح «پایدار» باشد. از مهم‌ترین نشانه‌های قوس ناپایدار عبارتند از:

۱- سوسو زدن قوس: در این حالت به‌نظر می‌رسد قوس به‌صورت نامنظم در حال خاموش و روشن شدن است. طول قوس بسیار زیاد یا بسیار کم باعث می‌شود که در اثر لرزش دست جوشکار، قوس دائم خاموش (ضعیف) شود یا در مذاب فرورفته و خفه گردد. آلوده بودن سطح قطعه کار، شدت جریان یا ولتاژ پایین و یا هر گونه مشکلی در پوشش الکترود می‌تواند عامل این پدیده باشد که در نهایت باعث غیریکنواختی در پهنا، انحنا و عمق جوش می‌شود.

۲- جابجایی دائم ریشه قوس روی سطح قطعه کار: به‌نحوی که جوشکار نتواند جوش مستقیم و صافی ایجاد کند. عوامل سوسو زدن می‌تواند باعث جابجایی ریشه قوس نیز بشود.

۳- انتقال نامنظم قطرات مذاب: در روش‌های الکترود مصرفی، نوک الکترود دائم ذوب می‌شود و به‌صورت قطراتی به داخل حوضچه مذاب می‌افتد. بهترین حالت آن است که قطرات ریز با فاصله کم و منظم منتقل شوند. اما گاه قطرات بسیار درشت و با فاصله منتقل می‌شوند که برخورد آن‌ها با حوضچه مذاب پاشش زیادی تولید می‌کند. همچنین قطرات ممکن است به خط راست منتقل نشوند، بلکه بعد از جدا شدن از نوک الکترود به بیرون از حوضچه مذاب پرتاب شوند. علاوه بر عواملی که در دو حالت قبل تأثیر داشتند، شدت جریان و ولتاژ زیاد نیز می‌تواند باعث پاشش[1] (ترشح) و جرقه شود. پاشش باعث ایجاد ظاهر نامناسب، هدررفت الکترود و غیریکنواختی جوش چه از نظر هندسه و چه ترکیب شیمیایی می‌شود.

قوس الکتریکی نیروهایی دارد که برآیندشان قطرات مذاب را از نوک الکترود دور کرده و به حوضچه مذاب وارد می‌کند. این نیروها آن‌قدر قوی هستند که در وضعیت‌های غیرتخت، قطره مذاب را با غلبه بر نیروی کشش سطحی و وزن آن، از نوک الکترود جدا کرده و به حوضچه مذاب وارد می‌کند.

مطالعه بیش‌تر

پنج منشأ احتمالی نیروی قوس را بیابید.

راهنمایی: نیروی جت پلاسما، اثر پینچ، فشار گاز درحال انبساط، تبخیر انفجاری رشته و اثر الکترومغناطیس.

[1]. Spatter

۳-۵-۲. منبع قدرت

شدت جریان، ولتاژ و بسامد[1] برق شهر در ایران به‌ترتیب A ۲۵-۱۵، V ۲۲۰ و Hz ۵۰ است. باتوجه به مکانیزم کار در روش SMAW، این حد از ولتاژ، خطر برق‌گرفتگی دارد. به‌همین دلیل منبع قدرت به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که اختلاف پتانسیل دو سر قوس (ولتاژ قوس) در بازه V ۴۰-۱۰ باشد. در مقابل برای حفظ توان تولیدی، جریان خروجی به بازه A ۴۰۰-۳۰ افزایش می‌یابد.

در این فرآیند از هر دو نوع جریان متناوب (AC[2]) و مستقیم (DC[3]) می‌توان استفاده کرد. معمولاً جریان متناوب از ترانسفورماتور و جریان مستقیم از ژنراتور برقی (دینام جوش) یا احتراقی (موتور جوش) و یا «ترانسفورماتورهای دارای یکسوکننده[4]» تأمین می‌شود. یکسوکننده‌ها در واقع برقِ AC ورودی را اصلاح می‌کنند و هیچ‌گاه نمی‌توانند یک برقِ DC خالص ارائه دهند. هرچه بسامدِ برق ورودی بیش‌تر باشد، برقِ DC خروجی از یکسوکننده‌ها در اصطلاح نرم‌تر است. اما ژنراتورها به‌کمک یک موتور از همان ابتدا برقِ DC خالص تولید می‌کنند. هنگامی که دسترسی به برق مشکل باشد، از موتور جوش استفاده‌می‌شود که از گاز یا بنزین استفاده می‌کند و یا به یک موتور خارجی مانند تراکتور وصل می‌گردد.

عملکرد ترانسفورماتورها در بسامدِ پایینِ برق شهر آن‌چنان که باید مطلوب نیست، که باعث می‌شود این دستگاه‌ها نسبتاً بزرگ و سنگین باشند و حین کار نیز بخش زیادی از انرژی را به‌صورت گرما هدر دهند. به‌همین‌دلیل نسل جدیدی از دستگاه‌های جوش، که از فناوریِ معکوس‌کننده[5] بهره می‌برند، بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند. این دستگاه‌ها ابتدا برقِ AC ورودی را به‌کمک یکسوکننده به DC و سپس به‌وسیله معکوس‌کننده به جریان پالسی با بسامدِ بالای kHz ۱۰ تبدیل می‌کنند. این بسامدِ بالا باعث افزایش عملکرد ترانسفورماتور می‌شود و در نتیجه می‌توان حجم و وزن دستگاه را به‌مقدار قابل‌توجهی کاهش داد.

---

[1] . Frequency
[2] . Alternating current
[3] . Direct current
[4] . Rectifier
[5] . Inverter

دستگاه‌هایی با این قابلیت، نسبت به نمونه‌های قبلی خود، بازدهی و قدرت بالاتری دارند و همچنین کیفیت جوش بالاتری را حاصل می‌کنند. این دستگاه‌ها که در ایران به‌نامِ «اینورتر[۱]» شناخته‌می‌شوند برای مصارف خانگی بسیار مناسب هستند و حتی با باتری خودرو نیز کار می‌کنند.

هنگام استفاده از DC امکان استفاده از انواع الکترود وجود دارد و پایداری قوس نیز بالاست. به حالتی‌که قطب مثبت منبع به الکترود و قطب منفی به قطعه کار وصل شود، الکترود مثبت (DCEP[۲]) یا قطبیت معکوس[۳] می‌گویند. این قطبیت برای فرآیندهای الکترودمصرفی مناسب‌تر است. عکس این قطبیت یعنی DCEN[۴] یا قطبیت مستقیم[۵] برای فرآیند الکترود غیرمصرفی مناسب‌تر است چرا که بخش عمده حرارت را روی قطعه کار متمرکز می‌کند (نه الکترود).

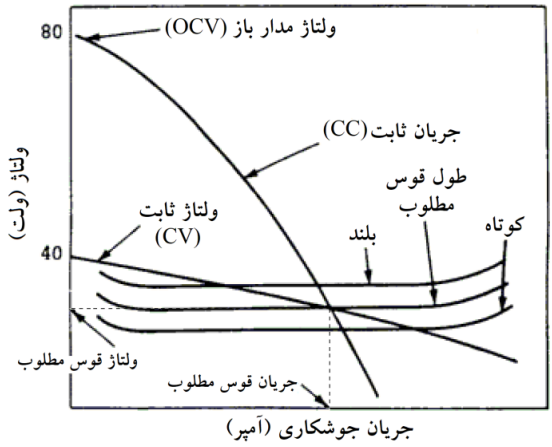
هر عاملی که تقارن میدان الکترومغناطیسی اطراف قوس را برهم بزند، باعث انحراف قوس یا در اصطلاح «وزش قوس[۶]» می‌شود. برای مثال نزدیک به لبه‌های قطعه کار و یا در نزدیکیِ اتصال به زمین یا منبع قدرت، به‌خصوص اگر شدت جریان بالاتر از A ۱۰۰۰ باشد، قوس از راستای الکترود خارج شده و به طرفی خاص کشیده می‌شود. در حالت AC، قطبیت جریان دائم عوض می‌شود و این تغییر متوالی جهت جریان باعث توزیع متقارنِ وزش قوس خواهد شد. در نتیجه جریان AC برای کاهش اثرات وزش قوس مناسب است. همچنین روشن کردن قوس با AC راحت‌تر از DC است.

دو نوعِ مهم از منابع قدرت براساس مشخصه ولت-آمپر وجود دارد؛ ۱- جریان ثابت (CC[۷]) یا سراشیبی[۸] و ۲- ولتاژ ثابت (CV[۹]) یا تخت[۱۰]. مشابه آن‌چه در شکل ۳-۱۵

---

[1] . Inverter welding unit or inverter welder
[2] . Direct Current Electrode Positive
[3] . Reverse polarity
[4] . Direct Current Electrode Negative
[5] . Straight polarity
[6] . Arc blow
[7] . Constant-current
[8] . Drooping
[9] . Constant Voltage
[10] . Flat

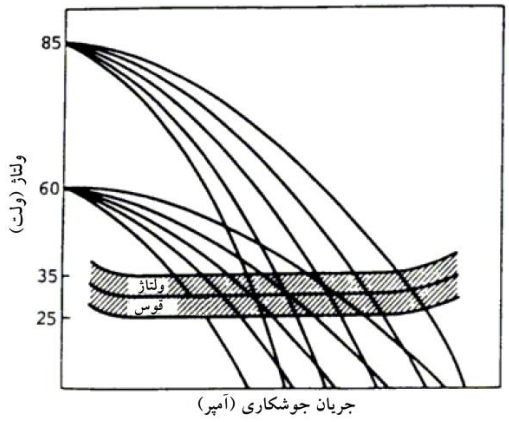
مشاهده‌می‌شود، محل تقاطع منحنی‌های مشخصه ولت-آمپر قوس الکتریکی و منبع قدرت مشخص‌کننده جریان و ولتاژ قوسی است که ایجاد می‌شود. قوس می‌تواند در فواصل مختلفی بین نوک الکترود و سطح قطعه کار برقرار شود، اما پایدارترین قوس در یک طول قوس بهینه ایجاد می‌شود.



شکل ۳-۱۵. منحنی مشخصه منبع قدرت جوشکاری.

هرچه طول قوس افزایش پیدا کند، بارهای الکتریکی باید مسافت بیش‌تری را طی کنند تا به قطب ناهمنام خود برسند، درنتیجه انرژی بیش‌تری مصرف می‌شود. بنابراین افزایش طول قوس به‌معنای افزایش مقاومت قوس و در نتیجه افزایش ولتاژ دو سر قوس است. شکل ۳-۱۵ نیز نشان می‌دهد که با افزایش یا کاهش طول قوس، منحنی مشخصه قوس در ولتاژهای بالاتر یا پایین‌تر قرار می‌گیرد. لرزش دست جوشکار در روش SMAW باعث تغییر مداوم طول قوس می‌شود. شدت جریان خروجیِ منبع قدرت با مشخصه سراشیبی (CC) حساسیت کمی به تغییرات طول قوس نشان می‌دهد و می‌تواند شدت جریان را حین جوشکاری تقریباً ثابت نگه دارد. به‌همین دلیل، این منبع قدرت برای روش SMAW و به‌طورکلی برای روش‌هایی که تغذیه الکترود به‌صورت دستی انجام می‌شود مناسب‌تر است.

اغلب دستگاه‌های جوش تک‌کنترله هستند و تنها قابلیت تغییر شدت جریان را دارند. در این دستگاه‌ها ولتاژ مدار باز (*OCV*[1]) ثابت است و با تغییر شدت جریان، شیب منحنی مشخصه تغییر می‌کند. در دستگاه‌های دوکنترله، امکان تغییر هر دو شدت جریان و ولتاژ مدار باز وجود دارد. شکل ۳-۱۶ منحنی‌های مشخصه این دستگاه‌ها را نشان می‌دهد. مزیت دستگاه‌های دوکنترله در آن است که برای شدت جریان‌های بالا می‌توان ولتاژ مدار باز را افزایش داد تا شیب منحنی‌های مشخصه افزایش یابد. هر چه شیب منحنی مشخصه بیش‌تر باشد، تغییرات جریان قوس حین جوشکاری کم‌تر خواهد بود. به‌عنوان جمع‌بندی باید گفت که اهرم‌های آمپر و ولتاژ (درصورت وجود) در دستگاه‌های جوش، به‌ترتیب جریان تقریبی قوس و ولتاژ مدار باز را تنظیم می‌کنند. اگر کابل‌ها طویل باشند مقاومت مدار (شکل ۳-۱۲) افزایش می‌یابد، و افت ولتاژ ایجادشده باید لحاظ گردد.



شکل ۳-۱۶. منحنی‌های مشخصه دستگاه‌های جوش دوکنترله.

مطالعه بیش‌تر

منبع قدرت با مشخصه ولتاژ ثابت (CV) چه کاربردی در جوشکاری دارد؟

[1] . Open-Circuit Voltage

۳-۵-۳. الکترود

همان‌طورکه قبل از این اشاره شد، الکترود در این فرآیند شامل یک هسته فلزی و یک پوشش از روان‌ساز است. ترکیب شیمیایی هسته الکترود معمولاً به ترکیب شیمیایی فلز پایه نزدیک است. منظور از اندازه الکترود، قطر هسته آن است. اندازه الکترود می‌تواند براساس عمق نفوذِ مورد نیاز انتخاب شود. یکی از فاکتورهای مهم در انتخاب شدت جریان، اندازه الکترود است. معمولاً جوشکاران برای به‌دست آوردن محدوده شدت جریان مناسب، اندازه الکترود (به mm) را در عددِ ۳۰ تا ٤۰ ضرب می‌کنند. برای مثال برای ورقی به ضخامت mm ۲/۵، الکترودی به‌اندازه mm ۲/٤ و شدت جریانِ A ۹۰-۵۰ مناسب است. برای صفحه‌ای به ضخامت mm ٤، الکترودی به‌اندازه mm ۳/۲ با شدت جریانِ A ۱۳۰-۹۰ می‌تواند استفاده شود.

پوشش علاوه بر محافظت وظایفی از جمله پایداری قوس، تصفیه فلز جوش، کنترل سرعت سرد شدن و ترکیب شیمیایی مذاب را به‌عهده دارد. برای شناسایی الکترودها می‌توان از لکه‌های رنگی یا کدهایی که روی آن‌ها درج می‌شود استفاده کرد. این کدها براساس استانداردهای مختلف تعریف می‌شوند. یکی از پرکاربردترین الکترودها برای جوشکاری فولادهای ساده کربنی، E6013 است. در استاندارد AWS، حرفِ E نشانه الکترود، دو عدد اول نشانه حداقل استحکام کششی جوش بر حسب ksi، عدد سوم نشانه وضعیت مناسب جوشکاری و عدد آخر بیانگر نوع پوشش است. بر این اساس E6013 الکترودی است که حداقل استحکامی برابر ٦۰ ksi (٤١٤ MPa) ایجاد می‌کند و برای همه وضعیت‌های جوشکاری مناسب است (عدد ۱). همچنین عدد ۳ نشان می‌دهد پوشش آن از نوع رتیلی[1] (TiO_2) با چسب سیلیکات پتاسیم است که با هر نوع جریانی (AC، DCEP و DCEN) می‌تواند استفاده شود. از آن‌جاکه پتانسیل یونیزاسیون اجزای پوشش این الکترود کم است، مقاومت الکتریکی کانال یونیزه‌شده کم‌تر خواهد بود. در نتیجه قوس راحت‌تر ایجاد می‌شود، نیروهای قوس قوی‌تر است و قوس پایداری بیش‌تر دارد.

---

[1] . Rutile

الکترودهای EXX2X برای وضعیت‌های تخت و افقی، و الکترودهای EXX3X تنها برای وضعیت تخت مناسب هستند. حرف X می‌تواند هر رقمی باشد. الکترودهای EXXX0 پوشش سلولزی دارند. ترکیبات هیدروکربنی این پوشش‌ها حین جوشکاری می‌سوزند و در نتیجه سربازه نازک‌تری تولید می‌شود. علاوه بر این، گازهای تولیدشده پتانسیل یونیزاسیون بالاتری دارند و قوسی با حرارت بیش‌تر تولید می‌کنند. بنابراین این الکترودها برای پاسه ریشه (پاسه ۱ در شکل ۳-٤) مناسب هستند، چراکه قدرت نفوذ بالایی دارند و نگرانی کم‌تری در زدودن سرباره آن‌ها وجود دارد. شایان ذکر است که قبل از شروع هر پاسه جوشکاری، باید سرباره پاسه‌های قبلی حذف گردد، در غیر این‌صورت قوس مطلوبی ایجاد نخواهد شد.

مطالعه بیش‌تر

کاربرد هر یک از الکترودهای زیر را بنویسید.

الکترود با پوشش‌های سلولزی با چسب سیلیکات پتاسیم (EXXX1)، رتیلی با چسب سیلیکات سدیم (EXXX2)، رتیلی با پودر آهن (EXXX4)، کم‌هیدروژن با چسب سیلیکات سدیم (EXXX5)، کم‌هیدروژن با چسب سیلیکات پتاسیم (EXXX6)، با پودر آهن و دارای اکسید آهن زیاد (EXXX7)، کم‌هیدروژن با پودر آهن و چسب سیلیکات پتاسیم (EXXX8).

سرباره و فلزِ مذاب تمایل کمی به حل یا مخلوط شدن در یک‌دیگر دارند. نیروهای پیوستگیِ[1] اتم‌های فلز بیش‌تر از نیروهای چسبندگی[2] بین اتم‌های فلز و سرباره است، درنتیجه همیشه نیرویی وجود دارد که سرباره مذاب را از فلز مذاب و همچنین فصل مشترک جوش (شماره ۹ در شکل ۳-۵) بیرون می‌راند. چگالی کم‌ترِ سرباره مذاب نسبت به فلز مذاب باعث تسهیل خروج آن به‌خصوص در وضعیت تخت می‌شود. سرباره نقطه ذوب کم‌تری نسبت به

[1] . Cohesive forces
[2] . Adhesive forces

فلز دارد، لذا آخرین لایه‌ای است که منجمد می‌شود. معمولاً انجماد از فصل مشترک جوش شروع می‌شود و حوضچه مذاب را به‌سرعت کوچک می‌کند. حین فرآیند انجماد، سرباره نیز به‌سرعت پس زده‌می‌شود تا درنهایت یک فلز جوشِ منجمد و عاری از سرباره شکل گیرد. بنابراین، علاوه بر وظایف ذکرشده، پوشش الکترود باید بتواند یک سرباره مطلوب از نظر خواص فیزیکی (از جمله گرانروی[1]، کشش سطحی، چگالی و نقطه ذوب) ایجاد کند.

۳-۵-٤. اثر پارامترهای فرآیند

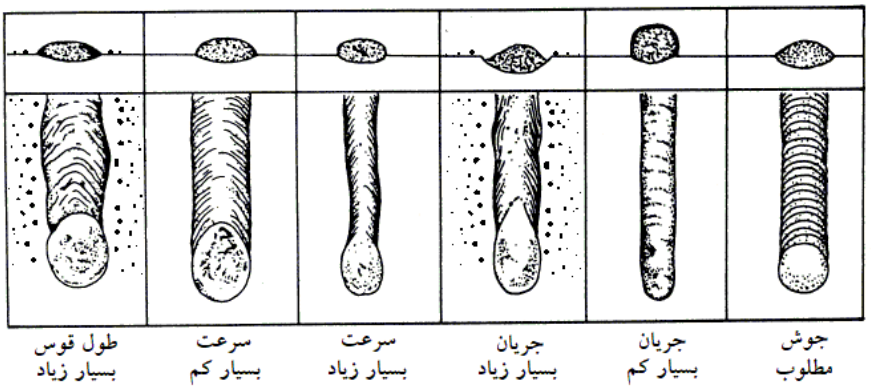
جریان (نوع، قطبیت و شدت)، ولتاژ، سرعت جوشکاری، الکترود (نوع و اندازه)، طول قوس، زاویه الکترود با قطعه کار و مهارت جوشکار از عوامل تعیین‌کننده در رسیدن به جوش مطلوب است. تعریف جوش مطلوب بسته به کاربردِ آن تفاوت دارد. در کاربرد وسایل برقی، حضور هرگونه آخال یا ناپیوستگی در جوش می‌تواند رسانایی الکتریکی را در محدوده جوش کاهش دهد. در کاربردهای دریایی، انتخاب نادرست نوع الکترود باعث کاهش «مقاومت خوردگی» در برابر آب شور می‌شود. اما مهم‌ترین معیار در تأیید جوش، استحکام مکانیکی آن است. استحکام شکست قطعه نهایی نباید کم‌تر از استحکام شکست مواد تحت اتصال باشد. علاوه بر پر نشدن کامل درز اتصال، عیوبی مانند آخال، ناپیوستگی و گوشه تیز می‌تواند باعث تمرکز تنش و کاهش استحکام جوش شود.

جوش باید پهنا و عمقی متناسب با اندازه الکترودِ انتخاب‌شده داشته‌باشد. همان‌طورکه شکل ۳-۱۷ نشان می‌دهد باید ابعاد جوش در طول پاسه یکنواخت بماند و امواج ناشی از هم‌پوشانیِ قطراتِ مذاب کاملاً منظم و یکنواخت باشد. در جریان‌های بسیار کم، حرارت قوس برای ذوب فلز پایه کم است و عمق جوش کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نیروهای قوس که نقش مهمی در جدا کردن قطرات از الکترود دارند ضعیف هستند و در نتیجه قطرات مذاب در نوک الکترود آن‌قدر بزرگ می‌شوند تا در اثر نیروی وزن از الکترود جدا شوند. در جریان‌های زیاد، حرارت زیاد منجر به افزایش حجم ذوب الکترود و فلز پایه می‌شود.

---

[1]. Viscosity

همچنین نیروهای قوس آن‌قدر زیاد می‌شوند که قطرات مذاب در نوک الکترود و همچنین در حوضچه مذاب را آشفته می‌کنند. پاشش زیاد، تخلخل، حبس آخال‌ها، ذوب اضافی و سوختگی کنار جوش نتیجه این آشفتگی‌ها و حرارت ورودی بیش‌ازحد است.



شکل ۳-۱۷. تأثیر متغیرهای مختلف بر ظاهر و هندسه جوش.

منظور از سرعت جوشکاری معمولاً سرعت حرکت الکترود در طول خط جوش است. همان‌طورکه شکل ۳-۱۷ نشان می‌دهد، با افزایش سرعت جوشکاری، پهنا و تا حدودی عمق جوش کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش سرعت جوشکاری، مدت زمان نگه‌داری قوس در هر نقطه کاهش می‌یابد، در نتیجه حرارت کم‌تری به فلز پایه وارد شده و حجم کم‌تری از آن ذوب می‌گردد. این پدیده را با فاکتوری به‌نام «حرارت ورودی به واحد طول خط جوش» بررسی می‌کنند که از رابطه (۳-۱) به‌دست می‌آید.

$$H_{input} = \mu \frac{V I}{S} \qquad (۳-۱)$$

که در آن V، I و S به‌ترتیب ولتاژ قوس (ولت)، جریان قوس (آمپر) و سرعت جوشکاری (mm/s) است. در اینجا μ فاکتور تصحیح و بدون بعد است که به راندمان حرارتی فرآیند جوشکاری و دیگر پارامترهای فرآیند بستگی دارد. واحدِ H_{input} طبق این رابطه j/mm خواهد بود. لذا هرچه V و I بیش‌تر و S کم‌تر باشد، انتظار آن است که حجم جوش

بیش‌تر باشد. اگرچه افزایش طول قوس باعث افزایش ولتاژ قوس و در نتیجه H_{input} می‌شود، اما ناپایداری قوس، پاشش زیاد و پخش شدن حرارت در سطح وسیع‌تر اجازه نمی‌دهد که حجم جوش افزایش یابد، بلکه تنها جوش را پهن‌تر می‌کند.

بخشی از پهنای جوش ناشی از حرکات رفت و برگشتی در عرض جوش است که می‌تواند به‌صورت زیگزاگی، دایروی‌شکل یا مارپیچی باشد. سرعت حرکت طولی و عرضی باید به‌گونه‌ای باشد که هر قطره جدید تقریباً دوسوم قطره قبلی را بپوشاند. رعایت این اصل باعث کاهش سرعت سرد شدن قطرات قبلی می‌شود و در نتیجه قطره مذاب فرصت می‌یابد تا قبل از انجماد جریان پیدا کرده و تمام فرورفتگی‌های اطراف خود را پر کند و از همه مهم‌تر به سرباره زمان داده‌می‌شود تا به‌طور کامل از مذاب فلز جدا شود و به سطح آن بیاید. با توجه به پروفیل جوش (شکل ۳-۵) می‌توان حدس زد که قطرات مذاب ممکن است در سطح جوش همپوشانی داشته‌باشند، اما در اعماق قطعه به هم نرسند و درز اتصال کامل پر نشود. این عیب به‌خصوص در فرآیند جوشکاری با جریان‌های پالسی و متناوب بروز می‌کند. بنابراین هم‌پوشانی کافی حوضچه مذاب با حوضچه منجمدشده قبلی اهمیت زیادی دارد.

مطالعه بیش‌تر

کاربرد خال‌جوش چیست؟

۳-۶. جوشکاری اکسی‌استیلن (OAW)

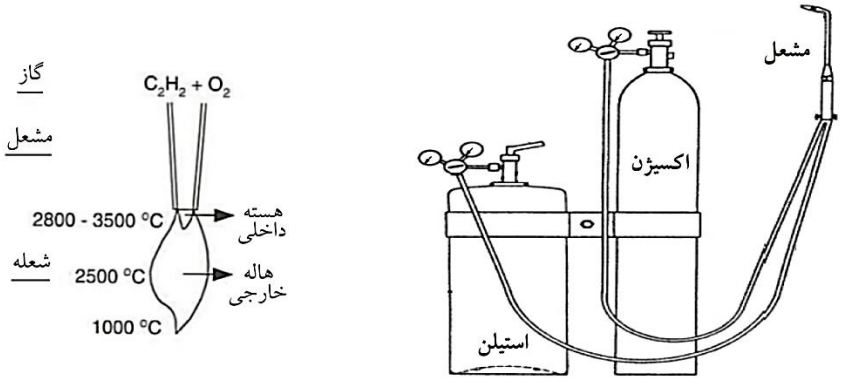
احتراق گاز استیلن (C_2H_2) در مقایسه با گازهای دیگر مانند متان (CH_4، CNG[1]، گاز شهری یا طبیعی)، بوتان (C_4H_{10})، پروپان (C_3H_8) و گاز مایع (LPG[2] که مخلوطی از بوتان و پروپان است)، دمای بالاتری فراهم می‌کند، چراکه ارزش حرارتی (گرمای واکنش) آن بالا و مقدار مولِ[3] محصولات آن کم‌تر است (واکنش ۳-۱). حین احتراق، مولکول‌های سوخت در

[1] . Compressed Natural Gas
[2] . Liquefied Petroleum Gas
[3] . Mole

جستجوی اکسیژنِ هوا پخش می‌شوند و این باعث حجیم شدن شعله می‌گردد. چنین شعله‌ای تمرکز حرارتی کافی برای ذوب فلزات را ندارد. برای حل این مشکل مخلوطی از استیلن و اکسیژنِ خالص را به محل احتراق وارد می‌کنند (شکل ۳-۱۸). به‌همین دلیل به شعله ایجادشده «اکسی‌استیلن» گفته‌می‌شود. جوشکاری اکسی‌استیلن نوعی از فرآیندهای جوشکاری ذوبی با واکنش‌های شیمیایی است که به «جوش گاز» نیز معروف است.

واکنش ۳-۱

$$2\ C_2H_2 + 5\ O_2 \rightarrow 4\ CO_2 + 2\ H_2O$$



شکل ۳-۱۸. اجزای جوشکاری اکسی‌استیلن و قسمت‌های مختلف شعله آن.

گاز استیلن طی دو مرحله می‌سوزد. احتراق اولیه (واکنش ۳-۲) در یک فضای مخروطی‌شکل (هسته داخلی[1]) در مجاورتِ خروجی مشعل رخ می‌دهد که طی آن C_2H_2 با O_2 واکنش داده و تولیدِ CO و H_2 می‌کند. این واکنش دوسومِ حرارت کل احتراق را تولید می‌کند، به‌طوری‌که دما در نوک هسته داخلی به حدود ۳۵۰۰ °C می‌رسد.

واکنش ۳-۲

$$2\ C_2H_2 + 2\ O_2\ (\text{از مخزن}) \rightarrow 4\ CO + 2\ H_2$$

[1]. Inner cone

در ادامه CO و H_2 تولیدی با اکسیژن هوا واکنش داده و به CO_2 و H_2O تبدیل می‌شوند (واکنش ۳-۳ و واکنش ۳-٤). این دو واکنش در هاله خارجی[1] شعله رخ می‌دهند. هاله خارجی روی منطقه جوش را می‌پوشاند، و اکسیژن درصورت ورود به این هاله توسط CO و H_2 مصرف می‌شود. به‌این‌ترتیب از منطقه جوش در برابر اکسیژن محیط محافظت می‌شود.

$$2\ H_2 + O_2\ (\text{از هوا}) + 3.78\ N_2 \rightarrow 2\ H_2O + 3.78\ N_2$$ واکنش ۳-۳

$$4\ CO + 2\ O_2\ (\text{از هوا}) + 7.56\ N_2 \rightarrow 4\ CO_2 + 7.56\ N_2$$ واکنش ۳-٤

اگر استیلن و اکسیژن به نسبت مولی ۱:۱ از مشعل خارج شوند، واکنش‌ها و شکل شعله به‌صورت بالا خواهد بود. با تغییر این نسبت، شکل و دیگر ویژگی‌های شعله تغییر خواهد کرد. فرض کنیم شیر استیلن به‌مقدار مشخص باز است و شعله را روشن می‌کنیم؛ با باز کردن تدریجی شیر اکسیژن و افزایش دبی اکسیژنِ دمیده‌شده، شعله به‌صورت ذیل تغییر می‌کند.

۱- استیلنی: میزان اکسیژن دمیده‌شده صفر است و سوخت کاملاً با اکسیژن هوا می‌سوزد. شعله بزرگ و به‌رنگ زرد مایل به نارنجی است و از انتهای آن دوده[2] پراکنده‌می‌شود. رنگ مذکور و به‌خصوص دوده‌ها نشانه احتراق ناقص سوخت هستند.

۲- کربن‌زا[3]: شعله شامل سه بخشِ هسته داخلی (آبی، نورانی)، بال استیلن[4] (سفید، نورانی) و هاله خارجی (زرد متمایل به نارنجی) است. بخشی از استیلن به‌دلیل کمبود اکسیژن از هسته داخلی خارج شده، و واکنش ۳-۲ در قسمت بال استیلن با اکسیژن هوا ادامه می‌یابد. گرچه دوده‌ای ایجاد نمی‌شود اما احتراق هنوز ناقص و دما کم است. احتراق ناقص به‌معنای تولید مقدار قابل‌توجهی H_2، CO و C است. این شعله برای کربوره کردن[5]، لحیم‌کاری سخت و جوش نقره مناسب است.

---

[1]. Outer envelope
[2]. Soot
[3]. Carburizing flame
[4]. Acetylene feather
[5]. Carburizing

۳- احیایی[1]: شعله تقریباً به رنگ شعله قبل است اما انـدازه هسـته داخلـی، هالـه خـارجی و به‌خصوص بال استیلن کوچک‌تر است. این شعله دما و تمرکـز حرارتـی بـالاتری فـراهم می‌کند و مشابه شعله‌های قبلی عاری از هرگونه اکسیژن است، بنابراین برای جوشـکاری فولادهای پرکربن و کم‌آلیاژی و همچنین آلومینیوم مناسب اسـت. سـوختن کـربنِ فـولاد علاوه بر تغییر ترکیب شیمیایی آن باعث تشکیل گونه‌های گازیِ CO و CO_2 می‌شود کـه می‌توانند در فلزِ جوش ایجاد تخلخل کنند. عناصر آلیاژی نیـز در صـورت در تمـاس بـا اکسیژن تولید آخال‌های اکسیدی می‌کننـد. واکـنش اکسـیژن بـا آلومینیـوم تولیـد اکسـید آلومینیوم می‌کند که نقطه ذوب بالایی دارد. این اکسید به‌صورت لایه‌ای در بـالای مـذاب آلومینیوم منجمد می‌شود و فرآیند جوشکاری را مختل می‌کند.

٤- خنثی[2]: با باز کردنِ بیش‌ترِ شیر اکسیژن، هسته داخلی و بال اسـتیلن بـه‌تـدریج روی هـم قرار می‌گیرند و شعله تقریباً خنثی به‌دست می‌آید. به‌عبارت دیگر، اگر سوخت و اکسیژن به نسـبت اسـتوکیومتری (۱ : ۱) بـا هـم مخلـوط شـوند، احتـراق اولیـه (واکـنش ۳-۲) به‌صورت کامل انجام خواهد شد و C_2H_2 اضافه برای احتراق با اکسیژنِ هوا باقی نخواهد ماند. بنابراین با باز کردن شیر اکسیژن به اندازه کافی شعله خنثی ایجاد می‌شود که شـامل هسته داخلی نورانی و هاله خارجی آبی‌رنگ کوچک‌تر از شعله‌های قبلی است. این شعله بهترین گزینه برای جوشکاری انواع فولادها است، به‌خصوص زمانی‌که فولاد بـه حضـور هردو اکسیژن و کربن حساس باشد. هرچه احتراق کامل‌تر باشد، حرارت تولیدی بیش‌تـر است و در شعله خنثی به حداکثر خود می‌رسد.

۵- اکسیدی[3]: اگر مقدار اکسیژن واردشده از حد استوکیومتری بیش‌تر باشد، شعله حاوی O_2 اضافه خواهد بود. این شعله متمرکزتر و برای برشکاری مناسب اسـت. همچنـین ممکـن است از آن برای جوشکاری مس استفاده شود. مس و آلیاژهای آن هدایت حرارتی بالایی دارند و برای ایجاد حوضچه مذاب روی آن‌ها نیاز به تمرکز حرارتی بـالایی اسـت. ایـن

---

[1] . Reducing flame
[2] . Neutral/balanced flame
[3] . Oxidizing flame

شعله گرچه حرارت بیش‌تری نسبت به شعله خنثی ندارد، اما به‌دلیل حجم کم‌تر دارای تمرکز حرارتی بالاتری است که قابلیت آن را در ذوب فلزات افزایش می‌دهد. شعله اکسیدی همچنین لایه‌ای از اکسید مس روی مذاب تشکیل می‌دهد که می‌تواند نقشی مشابه سرباره در روش SMAW را ایفا کند.

٦- جداشده: اگر میزان اکسیژن باز هم بالاتر رود (فشار گازها زیاد باشد)، شعله از نوک مشعل جدا شده و حتی ممکن است وارد مشعل شود. این شعله کاربردی ندارد.

در جوشکاری گاز، محافظت از جوش به‌عهده هاله شعله است. از طرفی تنظیم دقیق شعله خنثی کار آسانی نیست. لذا برای اطمینان از عدم وجود اکسیژن در شعله سعی می‌شود شعله «خنثی مایل به احیایی» باشد. در شعله‌هایی که با اکسیژن هوا می‌سوزند معمولاً نوک هاله شعله داغ‌ترین نقطه است، اما در شعله اکسی‌استیلن بالاترین دما در نوک هسته داخلی ایجاد می‌شود.

مطالعه بیش‌تر

١- این سه عبارت را تعریف کنید و تأثیر هر کدام را در ایجاد حوضچه مذاب بیابید؛ الف) میزان حرارت، ب) درجه حرارت (دما)، د) تمرکز حرارتی.

٢- وجه تسمیه جوش کاربید که گاه برای جوشکاری اکسی‌استیلن استفاده می‌شود، چیست؟

٣- گاه از جت اکسیژنِ خالص برای برشکاری فولادهای کربنی استفاده‌می‌شود که این روشِ برشکاری در ایران به «هوابرش» یا «برشکاری هواگاز» معروف است. مکانیزم تولید حرارت در این روش چیست؟

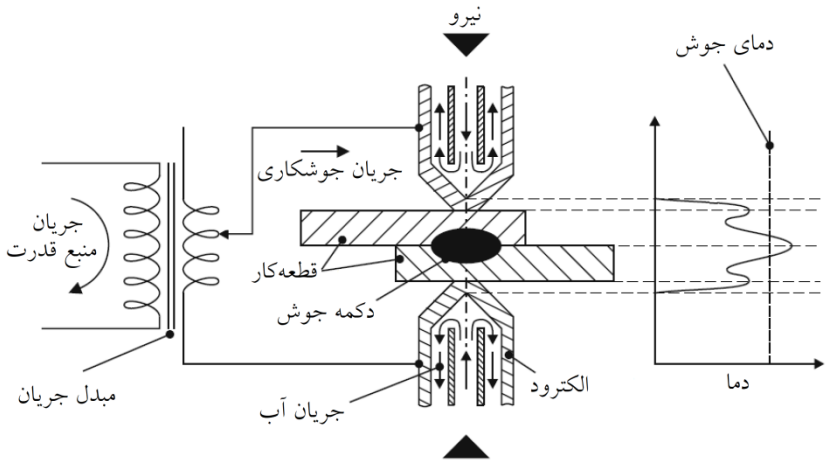
از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر جوش گاز می‌توان به فشار استیلن و اکسیژن، شماره افشانک[1] (قطر خروجی مخلوط گاز)، پرکننده (نوع و قطر)، روش جوشکاری و روان‌ساز

[1]. Nozzle

اشاره کرد. برای قطعات ضخیم که به حرارت ورودی (میزان حرارت) بالایی نیاز دارند، می‌توان از افشانک بزرگ‌تر و فشار گاز بیش‌تر استفاده کرد. باید توجه داشت که استفاده از فشار گازِ بیش‌تر از حد مجازِ افشانک باعث تلاطم در جریان گاز خواهد شد (معیار رینولدز[1]). روان‌ساز برای محافظت بیش‌تر و حذف ناخالصی‌ها حین جوشکاری چدن‌ها، فولادهای آلیاژی و فلزات غیرآهنی استفاده می‌شود.

۳-۷. جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW[2])

در این روش، مشابه شکل ۳-۱۹، دو لبه ورق روی هم قرار می‌گیرند و به‌وسیله دو الکترود شدت جریان بالایی از آن‌ها عبور می‌کند. الکترون‌ها تمایل دارند کوتاه‌ترین مسیر را طی کنند. از طرفی بین دو ورق به‌دلیل آلودگی‌ها و فاصله هوایی مقاومت الکتریکی بالایی وجود دارد (مقاومت تماسی). این دو عامل باعث می‌شود که در ناحیه‌ای کوچک بین دو ورق حرارت بالایی تولید شود که می‌تواند سطوح داخلی ورق‌ها را ذوب کند و دکمه جوش را به‌وجود آورد.



شکل ۳-۱۹. شماتیکی از فرآیند جوشکاری مقاومتی و توزیع حرارت در منطقه جوش.

[1] . Reynolds number
[2] . Resistance Spot Welding

در تمام مدت فشاری از طرف الکترودها به دو ورق وارد می‌شود. این فشار؛ ۱) مانع جابجا شدن ورق‌ها حین جوشکاری می‌شود، ۲) با نزدیک‌تر کردن دو ورق به‌یک‌دیگر از نفوذ هوا به دکمه جوش جلوگیری و نیاز به محافظت را برطرف می‌کند، ۳) مقاومت تماسی بین الکترود و قطعه‌کار را کاهش می‌دهد و از ایجاد حرارت ناخواسته در این ناحیه جلوگیری می‌کند و ٤) بعد از تشکیل ذوب لایه‌های اکسید را می‌شکند و به امتزاج بهتر مذاب کمک می‌کند. البته فشار بیش از حد می‌تواند باعث بیرون ریختن مذاب از درز اتصال یا فرو رفتن الکترودها در دکمه جوش شود.

تأثیر عوامل مختلف در جوشکاری مقاومتی را می‌توان به‌کمک دو رابطه ساده (۳-۲) و (۳-۳) نشان داد. طبق رابطه (۳-۲) هرچه شدت جریان (I) و زمان اعمال آن (t) بیش‌تر باشد، گرمای بیش‌تری (Q_g) تولید خواهد شد، اما طبق رابطه (۳-۳) زمان طولانی‌تر باعث افزایش هدررفت انرژی (Q_{ex}) از طریق رسانش می‌شود. همچنین رابطه (۳-۲) نشان می‌دهد که شدت جریان (I) توان دو دارد و تأثیر آن بیش‌تر از زمان (t) است. لذا زمان اعمال جریان تا حد ممکن کم نگه‌داشته‌می‌شود تا از گرم شدن بیش‌ازحد قطعه جلوگیری شود و به‌جای آن شدت جریان به‌کمک مبدل به سه تا ۱۰۰ هزار آمپر افزایش می‌یابد. این کمک خواهد کرد تا برآیند دو حرارت تولیدی و خروجی در واحد زمان به‌قدری برسد تا بتواند فلز را ذوب کند.

$$\frac{Q_g}{t} = \frac{R\, I^2\, t}{t} = R\, I^2 \qquad (۳-۲)$$

$$\frac{Q_{ex}}{t} = \frac{K\, A\, \Delta T}{l} = K\, G\, \Delta T \qquad (۳-۳)$$

که در اینجا Q_g حرارت تولیدی (j)، t زمان اعمال جریان حین جوشکاری (s)، R مقاومت الکتریکی (Ω)، I شدت جریان (آمپر)، Q_{ex} حرارت خروجی به روش رسانایی (j)، K ضریب رسانایی حرارتی قطعه ($^{w}/_{mm\ ^{o}C}$) و ΔT اختلاف دما بین دکمه جوش و محیط اطراف (^{o}C) است. همچنین A (mm^2) و l (mm) ابعاد قطعه هستند که می‌توان آن‌ها را در فاکتور هندسی G (mm) خلاصه کرد. باید توجه داشت که هرچه ضخامت ورق‌ها بیش‌تر باشد، با توجه به ظرفیت حرارتی ویژه خود، می‌توانند مکش حرارتی بیش‌تری از دکمه جوش

داشته‌باشند و در نتیجه نرخ خروج حرارت را افزایش دهند. حرارت از چهار مقاومت الکتریکی نشأت می‌گیرد؛

۱) مقاومت الکتریکی الکترودهای مسی که کم است و حرارت ناچیزِ تولیدشده در آن‌ها نیز به‌کمک جریان آب خارج می‌شود،

۲) مقاومت تماسی بین الکترود و قطعه‌کار که باید با رفع آلودگی‌ها از سطح الکترود و قطعه‌کار، اعمال نیروی مناسب و انتخاب شکل مناسب الکترود کاهش یابد. حرارت ایجادشده گاه باعث ایجاد ذوب در این منطقه می‌شود که علاوه بر ایجاد ظاهری نامناسب روی سطح قطعه کار، نوک الکترودها را نیز آلوده می‌کند،

۳) مقاومت قطعه‌کار که تا حدودی باعث پیش‌گرم‌شدن آن می‌شود (کاهش ΔT) و درنتیجه مکش حرارتی از دکمه جوش را کم می‌کند.

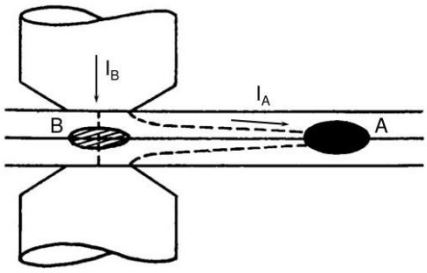
٤) مقاومت تماسی بین دو ورق که حرارت اصلی برای ذوب را ایجاد می‌کند. همان‌طورکه در شکل ۳-۱۹ مشاهده‌می‌شود، این منطقه بالاترین درجه حرارت را دارد.

شکل ۳-۱۹ نشان می‌دهد که قطر سر الکترود (d_e) کم‌تر از قطر بدنه آن است. نوک‌تیز بودن سر الکترود باعث افزایش تمرکز جریان الکتریکی می‌شود. از آن‌جاکه الکترون‌ها همیشه کوتاه‌ترین و هادی‌ترین مسیر را انتخاب می‌کنند، کاهش سطح تماس الکترود با قطعه‌کار می‌تواند تمرکز جریان الکتریکی را در محل تماس دو ورق نیز افزایش دهد. تجربه نیز نشان داده‌است که قطر دکمه جوش (d_{nugget}) نمی‌تواند از ۱۱۵٪ قطر سر الکترود (d_e) تجاوز کند. در جوشکاری فلزاتی مانند مس و آلومینیوم که ضریب رسانایی حرارتی (K) بالایی دارند پیشنهاد می‌شود که d_e کوچک‌تر انتخاب شود.

شدت جریان و مدت زمان اعمال آن مقادیر بهینه‌ای دارند. انتخاب مقادیر کمِ این دو پارامتر باعث کوچک شدن دکمه جوش می‌شود که نتیجه آن کاهش استحکام اتصال است. با افزایش این دو پارامتر، به‌تدریج d_{nugget} افزایش پیدا می‌کند تا به ۱۱۰٪–۱۱۵٪ اندازه d_e برسد. افزایش بیش‌ترِ شدت جریان یا زمان، تغییر محسوسی در d_{nugget} ایجاد نخواهد کرد، بلکه عمق ذوب (شکل ۳-۷) را افزایش می‌دهد. در نهایت الکترود می‌تواند وارد دکمه جوش شده و آن

را معیوب نماید. در این مواقع برای داشتن دکمه جوش بزرگ‌تر بهتر است که قطر سر الکترود (d_e) افزایش یابد.

هنگامی‌که چند دکمه جوش در مجاورت هم ایجاد می‌شود، اگر فاصله دکمه‌های جوش کم باشد، مقداری از جریان الکتریکی از دکمه قبلی می‌گذرد. به این پدیده که به‌صورت شماتیک در شکل ۳-۲۰ نشان داده‌شده‌است اثر انحراف جریان (شانتینگ[1]) گفته‌می‌شود. انحراف جریان معمولاً باعث کاهش اندازه دکمه جوش جدید و در نتیجه کاهش استحکام آن می‌شود. میزان جریان نشت‌کرده از دکمه جوش قبلی به اندازه دکمه‌ها و همچنین فاصله آن‌ها بستگی دارد که باید در طراحی جوش لحاظ شود.



شکل ۳-۲۰. اثر انحراف جریان در جوشکاری مقاومتی.

۳-۸. عیوب در جوش

در بخش ۱-۱ منشأ ضعف مکانیکیِ سازه در سه سطح بررسی شد. در واقع افت تمامی خواص ماده را می‌توان در این سه سطح بررسی کرد. برای مثال در مورد مقاومت به خوردگی که نوعی خاصیت شیمیایی است می‌توان به سه نمونه ذیل اشاره کرد.

۱- اگر در جوشکاریِ فولادهای زنگ‌نزن از الکترود معمولی مثل E6013 استفاده شود، مقدار کروم در ترکیب شیمیایی فلز جوش (WM) کاهش یافته و سازه در محل جوش مستعد خوردگی خواهد بود.

[1]. Shunting effect

۲- مرزِ بین دانه‌ها (مرزدانه‌ها[1]) مناطقی ضعیف در برابر خوردگی هستند؛ هرچه دانه‌ها ریزتر باشند، میزان مرزدانه‌ها بیش‌تر و در نتیجه مقاومت به خوردگی ماده کم‌تر است. با این وجود، کاهش اندازه دانه (افزایش چگالی مرزدانه‌ها) در بعضی آلیاژها باعث افزایش مقاومت به خوردگی با مکانیزم‌های دیگر می‌شود. بنابراین تغییر اندازه دانه که معمولاً در HAZ اتفاق می‌افتد می‌تواند نوعی عیب محسوب شود.

۳- ترک خوردگی تنشی (SCC[2]) موضوعی جدی در علم خوردگی است. ماده در نقاطی که دچار خوردگی موضعی شده‌است راحت‌تر ترک می‌خورد و در مقابل، رشد ترک باعث تشدید خوردگی در رأسِ آن می‌شود. ترک‌ها با این همکاریِ دوطرفه تنش و خوردگی به‌تدریج رشد نموده و سازه را بعد از چند سال یا حتی چند روز تخریب می‌کنند. بنابراین موادی که حساس به SCC هستند به‌راحتی در گوشه‌های تیز و ناپیوستگی‌ها (ترک و تخلخل) دچار خوردگی موضعی می‌شوند چرا که این عیوب محل تمرکز تنش هستند.

در بحث عیوبِ جوش باید این نکته را در نظر داشت که یک «جوش سالم» همیشه «جوش مطلوب» نخواهد بود. برای مثال در نمونه اول ممکن است جوشکار جوش بدون عیب و سالمی ایجاد کند اما این جوش به‌دلیل انتخابِ اشتباهِ الکترود مطلوب نیست. در واقع سالم بودنِ جوش یکی از شروط لازم برای مطلوب بودن آن است. طراحِ جوش مواد و تجهیزات مورد نیاز و پارامترهای مناسبِ جوشکاری را بر اساس کاربرد سازه انتخاب می‌کند و دستورالعمل فرآیند جوشکاری (WPS[3]) را می‌نویسد. جوشکار یا اپراتور موظف به ایجاد جوش سالم هستند. طراح جوش سازه را از نظر سلامت و کارایی مورد ارزیابی قرار می‌دهد. اگر جوش ایجاد شده مطلوب نباشد یک WPS جدید می‌نویسد. این چرخه آن‌قدر ادامه پیدا می‌کند تا WPS تأیید شود و در نهایت در قالبِ دستورالعمل اجرایی جوش (PQR[4]) در اختیار کارفرما قرار گیرد. کارفرما مواد، تجهیزات و نیروی کار را بر اساسِ PQR انتخاب کرده

---

[1] . Grain boundaries
[2] . Stress Corrosion Cracking
[3] . Welding Procedure Specification
[4] . Procedure Qualification Record

و شروع به تولید سازه می‌کند. بازرس جوش بر اساس حد پذیرش عیوبِ[1] ذکرشده در PQR، جوش‌های ایجادشده را تأیید یا رد می‌کند. حد پذیرش عیوب بر اساس کاربرد متفاوت است، برای مثال وجود یک ترکِ یک میلی‌متری در بدنه بخاری مشکلی ایجاد نمی‌کند، اما همین ترک در مخزن گاز خودرو می‌تواند فاجعه‌آفرین باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت که جوشکار و به‌خصوص بازرسِ جوش باید مسئولیت عدم سلامت جوش را قبول کنند، در حالی‌که مسئولیتِ جوش بی‌کیفیت و نامطلوب متوجه هر سه شخصِ طراح، جوشکار و بازرس است.

۳-۸-۱. لکه قوس[2]

در اثر تماس لحظه‌ای الکترود یا سر کابل با قطعه کار، ذوب جزئی در سطح آن اتفاق می‌افتد و لکه‌ای آبله‌گونه ایجاد می‌شود. این لکه‌ها ظاهر نامناسبی در سطح قطعه ایجاد می‌کنند و ممکن است پوشش‌دهی یا رنگ‌آمیزی بعدی را با مشکل روبه‌رو نمایند. گرم کردن اولیه الکترود روی قطعه کار مهم‌ترین عامل بروز این عیب است که گاه جوشکار به اشتباه انجام می‌دهد. در جوشکاری مقاومتی نیز در صورت آلوده بودن سر الکترود یا سطح قطعه کار، لکه‌ای مشابه ایجاد می‌شود. در آلیاژهایی مانند فولاد پرکربن، این گرم و سرد شدنِ سریع موجب ترد شدنِ موضعی در ناحیه لکه قوس می‌شود. تنش‌های باقی‌مانده، ترد شدن و حتی تمرکز تنش در اطراف لکه قوس می‌تواند باعث تسهیل جوانه‌زنی ترک حین کار شود.

۳-۸-۲. پاشش

قطرات مذابی که به هر دلیلی از الکترود یا حوضچه جوش به اطراف پرتاب می‌شوند را پاشش (ترشح یا جرقه) می‌گویند. معمولاً قطراتی که در نزدیکی فلز جوش فرود می‌آیند به سطح قطعه کار جوش می‌خورند و برطرف کردن آن‌ها مشکل‌تر است. اما قطراتی که فاصله بیش‌تری را طی می‌کنند معمولاً سرد هستند و جدا کردن آن‌ها از سطح راحت‌تر است، با این

[1] . Acceptance criteria for weld defects
[2] . Arc strike

وجود اثرات آن‌ها را می‌توان روی لباس کار یا ماسک جوشکاری دید. عوارض این عیب مشابه با لکه قوس است.

۳-۸-۳. آخال‌های محبوس‌شده

آخال‌ها فازهای ناخواسته‌ای هستند که باعث تغییر خواص ماده می‌شوند. از جمله مهم‌ترین آخال‌های فلزی می‌توان به مس و تنگستن اشاره کرد. در اثر برخورد نازل مسی به مذاب در روش SAW امکان ورود مس به فلز جوش وجود دارد. همچنین تنگستن در فرآیند GTAW به طریق مشابه می‌تواند وارد حوضچه مذاب شود. انواع آخال‌های غیرفلزی از جمله اکسیدها، نیتریدها، کاربیدها و سولفیدها می‌توانند در اثر واکنش‌های فلز/سرباره/اتمسفر تولید شده و در فلز جوش محبوس شوند.

سرباره محبوس‌شده از رایج‌ترین آخال‌های درون جوش است که می‌تواند موجب تردی فلز جوش و همچنین تشدید خوردگی آن شود. تمیز نکردن سرباره پاسه قبلی در جوشکاری چندپاسه (شکل ۳-٤)، مهارتِ کم جوشکار، زاویه نامناسب الکترود، حرکات زیگزایگی در وضعیت غیرتخت و هر عاملی که باعث اغتشاش مذاب و سرد شدنِ نامناسبِ آن شود می‌تواند به حبس ذرات سرباره در فلز منجر گردد.

۳-۸-٤. تخلخل

حفرات (خلل و فرج یا حباب‌های گازی) بر اساس منشأ پیدایش خود به دو دسته انقباضی و گازی تقسیم می‌شوند. اگر حفره‌ای در اثر انقباض حین استحاله انجماد ایجاد شود و مذاب کافی برای پر کردن آن وجود نداشته‌باشد، حفره باقی‌مانده از نوع انقباضی خواهد بود. محل حفرات انقباضی تا حد زیادی به جهت و نرخ خروج حرارت بستگی دارد. به‌عبارتی حفره انقباضی در محلی ایجاد می‌شود که آخرین بخش از مذاب منجمد می‌شود. برای مثال نرخ خروج حرارت از دکمه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW) در تمام جهات تقریباً برابر است، بنابراین احتمال تشکیل حفره در مرکز دکمه جوش بیش‌تر است. در جوشکاری قوسی و اکسی‌استیلن، نرخ خروج حرارت از فصل مشترک فلز پایه و

فلز جوش بیش‌تر از سطح جوش است، لذا حفرات معمولاً به سطح فلز جوش نزدیک‌تر هستند.

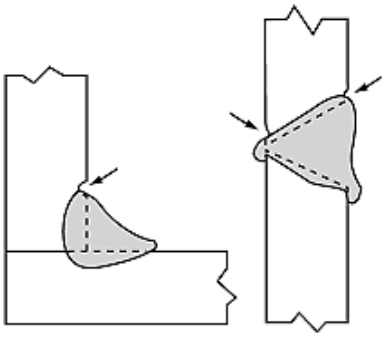
حفره گازی، همان‌طورکه از نام آن پیدا است، در اثر محبوس شدن گاز در مذابِ در حال انجماد شکل می‌گیرد. گازها می‌توانند از منابع مختلفی باشند؛ ۱) حرکت‌های نامناسبِ دست جوشکار و یا انتخاب اشتباهِ پارامترهای جوشکاری به‌طوری‌که باعث اغتشاش حوضچه مذاب و افزایش سرعت سرد شدن آن و در نتیجه حبس هوا حین انجمادِ فلز جوش شود، ۲) سوختن یا تبخیر عناصر الکترود یا فلز پایه، برای مثال سوختن کربنِ چدن‌ها تولید گازهای CO_2 و CO می‌کند، ۳) گازهای شعله یا گاز محافظ در صورتی‌که فشار بیش از حد داشته‌باشند، ٤) تبخیر یا سوختن آلودگی‌هایی مانند رطوبت و چربی و ۵) انحلال گازها در مذاب و خروج آن‌ها حین انجماد به‌علت کاهش حد حلالیت. حفرات می‌توانند به‌صورت درشت، ریز و پراکنده (خوشه‌ای[1]) و یا به‌هم‌پیوسته (کرمی‌شکل[2]) باشند.

۳-۸-۵. سوختگی کنار جوش

این عیب در پنجه جوش مشاهده‌می‌شود و زمانی رخ می‌دهد که جوشکار به فلز مذاب اجازه نمی‌دهد فرورفتگی ایجادشده در اثر ذوب فلز پایه را به‌طور کامل پر کند. زاویه نامناسب الکترود یا مشعل باعث می‌شود تا مذاب در اثر نیروهای قوس یا فشار گاز از کناره‌های جوش رانده‌شود. در این حالت اگر سرعت سرد شدن فلز جوش زیاد باشد، مذاب فرصت پر کردن فرورفتگیِ مذکور را نمی‌یابد و سوختگی یا بریدگی کنار جوش اتفاق می‌افتد. گاه استفاده از حرکات زیگزاگی و مکث در کناره‌ها در کاهش عیب مؤثر است. این عیب در وضعیت‌های جوشکاری غیرتخت بیش‌تر دیده‌می‌شود (شکل ۳-۲۱). جوشکار در این وضعیت‌ها باید از نیروهای قوس یا فشار گاز در جهت خنثی کردن نیروی وزن مذاب استفاده نماید تا بتواند فرورفتگی را در لحظه مناسب پر کند.

---

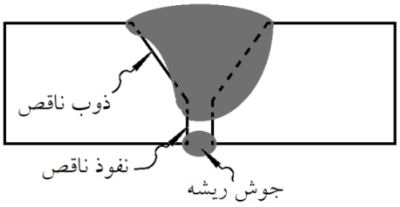
[1] . Cluster porosity
[2] . Wormhole porosity



شکل ۳-۲۱. عیب بریدگی کنار جوش در جوش شیاری و نبشی.

۳-۸-٦. پر نشدن درز اتصال

عمق جوش (شکل ۳-۵) باید به اندازه‌ای باشد که بتواند درز اتصال را تا عمق پیش‌بینی‌شده پر کند. برای مثال در شکل ۳-۲۲ انتظار آن بوده که جوش ایجادشده با جوش ریشه هم‌پوشانی داشته‌باشد. اما همان‌طورکه مشاهده‌می‌شود، عمق جوش کافی نبوده و درز اتصال به‌طور کامل پر نشده‌است، و در اصطلاح عیب «نفوذ ناقص[1]» ایجاد شده‌است.



شکل ۳-۲۲. طرحواره عیوب ذوب ناقص و نفوذ ناقص.

عدم ذوبِ فلز در حد فاصل رویه و ریشه جوش (شکل ۳-۵) نوعی ناپیوستگی ایجاد می‌کند که آن را عیبِ «ذوب ناقص[2]» می‌نامند. شکل ۳-۲۲ نمونه‌ای از این عیب را نشان می‌دهد که در اثر ذوب ناقص یکی از دیواره‌ها (رویه‌های ذوب) پدید آمده‌است. از جمله علل این عیب می‌توان به اختلاف زیاد در نقطه ذوب یا هدایت حرارتی فلزاتِ پایه در

[1] . Lack of penetration (LOP)
[2] . Lack of fusion (LOF)

جوشکاری فلزاتِ غیرهمجنس، وجود آلودگی‌هایی مانند اکسید و چربی روی دیواره‌ها، زاویه نامناسب الکترود و حتی ضخامت متفاوت دو فلز پایه اشاره کرد. حذف ناقص سرباره از پاسه‌های زیرین (در جوشکاری چندپاسه) و یا از سطح جوش ریشه نیز می‌تواند موجب عیب ذوب ناقص شود.

۳-۸-۷. ذوب اضافی

شماره ٤ در شکل ۳-۵ این عیب را نشان می‌دهد که ناشی از تجاوز عمق جوش از ضخامت قطعه‌کار است. حرارت ورودی (H_{input}) باید متناسب با ضخامت قطعه تنظیم شود. زاویه حرکت الکترود باید متناسب با روش جوشکاری و حرارت ورودی باشد. برای مثال در صورت بروز این عیب در روش پس‌دستی، بهتر است زاویه حرکت افزایش یابد. پاشنه پخ کم و درز اتصال زیاد نیز باعث افزایش احتمال به‌وجود آمدن ذوب اضافی می‌شود. در این موارد بهتر است مشابه شکل ۳-۲۲ ابتدا با یک الکترود نازک‌تر، جوش ریشه ایجاد شود. حد پذیرشِ بیرون‌زدگی مذاب از پشت قطعه‌کار برای کاربردهای مختلف متفاوت است. برای مثال این عیب در لوله‌ها می‌تواند باعث اغتشاش در جریان سیال شود و شرایط را برای خوردگی تشدید کند.

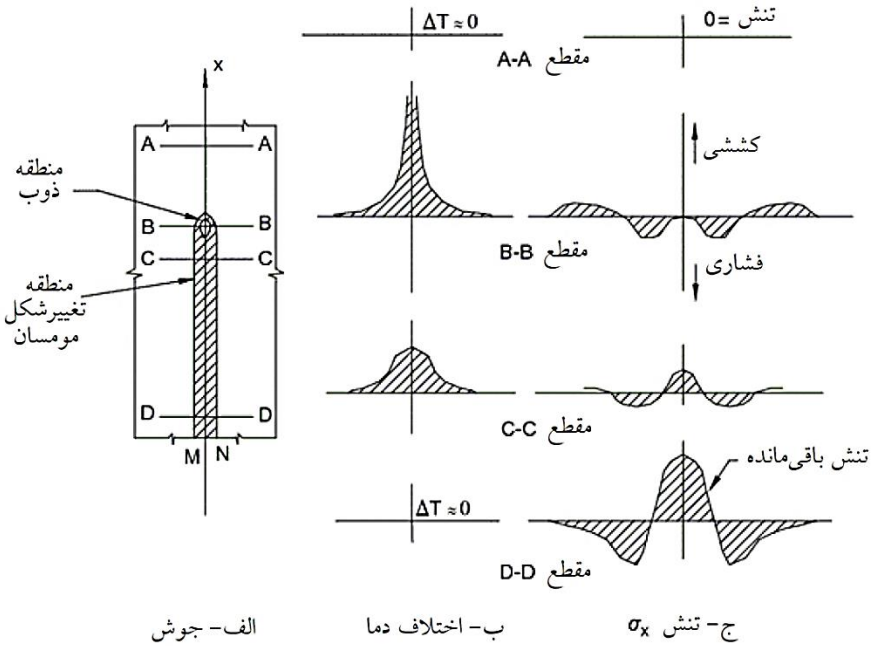
۳-۸-۸. تنش باقی‌مانده[1]

شکل ۳-۲۳ نحوه ایجاد تنش در مقاطع مختلف جوش را نشان می‌دهد. دما در ناحیه‌ای دور از جوش (A-A) هنوز تغییر نکرده‌است و کرنشی[2] به‌وجود نمی‌آید. میزان کرنشِ حرارتی با اختلاف دمای تجربه‌شده (ΔT) و ضریب انبساط حرارتی ماده متناسب است. در مقطع B-B، مناطق مجاور حوضچه جوش نسبت به مناطق دورتر دمای بالاتری دارند و انبساط بیش‌تری نشان می‌دهند. مناطق دورتر از این انبساط جلوگیری می‌کنند و به‌نوعی مناطق داغ‌تر را تحت فشار قرار می‌دهند. درنتیجه در مجاورت حوضچه مذاب تنش فشاری و در فاصله

[1]. Residual stress
[2]. Strain

دورتر تنش کششی ایجاد می‌شود. اگرچه فلز مذاب نیز انبساط دارد، اما به‌علت سیالیت بالا تنشی در آن ایجاد نمی‌گردد.

استحکام تسلیم فلزات با افزایش دما کاهش می‌یابد، بدین معنی که فلزات در دمای بالاتر به تنش کم‌تری برای تغییرشکلِ مومسان نیاز دارند. همچنین افزایش دما باعث افزایش شکل‌پذیری فلزات می‌شود، یعنی یک تنشِ خاص ماده داغ‌تر را دچار کرنش مومسان بیش‌تری می‌کند. بنابراین امکان ایجاد کرنش‌های مومسان در فلز جوش و اطراف آن وجود دارد. این کرنش‌های مومسان باعث ایجاد یک تغییرشکل موضعیِ پایدار در منطقه جوش می‌شوند.



شکل ۳-۲۳. نحوه ایجاد تنش‌های باقی‌مانده در جوش. مقدار ΔT نسبت به دمای اولیه قطعه‌کار است.

مقطع C-C در شکل ۳-۲۳ در حال سرد شدن و انقباض است، و این‌بار انقباضِ غیریکنواخت باعث ایجاد تنش کششی در فلز جوش و مناطق اطراف آن و تنش فشاری در

فلز پایه می‌شود. فلز جوش در این مقطع منجمد شده‌است و می‌تواند متحمِل نیرو باشد. در نتیجه فرآیند انجماد که با انقباض زیادی همراه است، تنش قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کند. انقباض نابرابرِ مناطقِ مختلف تا هم‌دما شدنِ کل سازه ادامه دارد و باعث تشدید تنش‌ها می‌شود.

مقطع D-D شرایط فلز جوش را در دمای محیط نشان می‌دهد. آن بخش از تنش‌های حرارتی را که در ماده باقی می‌ماند «تنش باقی‌مانده» یا «تنش پسماند» می‌نامند. اگرچه این تنش‌ها در محدوده کشسان هستند، اما حین کار با تنش‌های خارجی جمع می‌شوند و می‌توانند خطرآفرین باشند. هرچه شیب حرارتی ایجادشده و حجم فلز جوش بیش‌تر باشد، تنش‌های حرارتی بیش‌تری ایجاد می‌شود. پیش‌گرم[1] یا پس‌گرم[2] (گرم کردن قطعه کار قبل یا بعد از جوشکاری) موجب کاهش ΔT می‌شود و روشی مناسب برای کاهش تنش‌های پسماند است. با توجه به کاربرد سازه و تعداد زیاد پارامترهای مؤثر بر جوش نهایی، گاه مطالعه تنش‌های پسماند نیازمندِ شبیه‌سازی‌های سنگین حرارتی-مکانیکی است. این شبیه‌سازی‌ها می‌تواند با نرم‌افزارهای نام‌آشنایی مانند Abaqus و Ansys و یا نرم‌افزارهای تخصصی‌تر مانند Sysweld و Simufact Welding انجام شود. سرعت جوشکاری بالا و طول قوس زیاد باعث افزایش تنش‌های باقی‌مانده به‌خصوص در روش‌های الکترود مصرفی می‌شود. در این شرایط حرارت کافی برای پیش‌گرم فلز پایه مهیا نمی‌گردد، در عین حال قطرات مذاب روی سطح قرار گرفته و منجمد می‌شوند، بنابراین شیب دمایی (ΔT) در اطراف جوش زیاد است.

۳-۸-۹. ترک

ترک زمانی به وجود می‌آید که مجموعه‌ای از پیوندهای بین‌اتمی یا بین‌مولکولیِ مجاورِ هم در اثر اعمال نیرو شکسته شود. با این تعریف می‌توان ترک را از ناپیوستگی‌های دیگر تمیز داد. به‌طور کلی هرگونه ناپیوستگی از جمله تخلخل، پر نشدن درز اتصال و ترک باعث تمرکز تنش و همچنین کاهش سطح تحمل بار می‌شود که نتیجه آن کاهش استحکام سازه است.

---

[1] . Preheat
[2] . Postheat/post heating

رأس ترک نسبت به سایر ناپیوستگی‌ها تیزتر است، به‌طوری‌که شعاع رأس ترک در بعضی مواد حتی به محدوده شعاع اتمی می‌رسد. تیز بودن و به‌طورکلی هندسه خاصِ ترک باعث ایجاد تمرکز تنش نسبتاً زیادی در رأس آن می‌شود. به‌همین دلیل، ترک‌خوردگی تنها عیبی است که تقریباً در تمام استانداردها برای آن حد پذیرش تعریف نشده و حتی در بعضی موارد اجازه تعمیر نیز داده‌نمی‌شود. ترک‌خوردگی‌ها بر اساس دمای وقوع در دو دسته گرم[1] و سرد[2] قرار می‌گیرند که در ادامه شرح داده‌می‌شود.

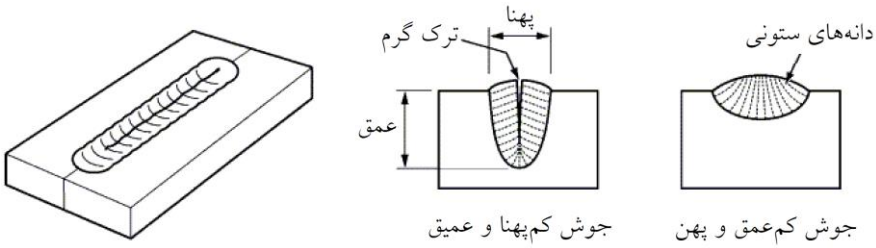
ترک گرم در نزدیکی نقطه انجماد[3] به وجود می‌آید. نقطه ذوب و نقطه انجمادِ فلزِ خالص برهم منطبق است، درحالی‌که فلزات ناخالص و آلیاژها «محدوده انجماد» دارند. به محض عبور از نقطه ذوب حین سرد شدنِ آلیاژها یا فلزات ناخالص، دانه‌های جامد جوانه می‌زنند. این دانه‌ها در محدوده انجماد رشد می‌کنند تا آن‌که در نزدیکی نقطه انجماد به یکدیگر می‌رسند. با عبور از نقطه انجماد، آخرین مذاب که در مرز بین دانه‌ها قرار گرفته منجمد می‌شود. اگر آخرین مذاب بعد از انجماد استحکام شکست بالایی داشته‌باشد دچار تنش‌های باقی‌مانده و یا کرنش مومسان می‌شود، در غیر این‌صورت می‌شکند و در مرزدانه‌ها ترک ایجاد می‌کند. باید توجه داشت که دمای منطقه ذوب جزئی (PMZ) نیز به نقطه انجماد می‌رسد، بنابراین امکان ایجاد ترک گرم در HAZ نیز وجود دارد.

گوگرد نوعی ناخالصیِ رایج در فولادها است که با اتم‌های آهن تشکیل سولفید آهن (FeS) می‌دهد. سولفید آهن نقطه ذوب پایینی دارد و در آخرین مراحل انجماد، لایه‌ای پیوسته در مرزدانه‌ها شکل می‌دهد. این آخال بعد از انجماد بسیار ترد است و نمی‌تواند تنش‌های حرارتی بین‌دانه‌ای را تحمل کند، و بنابراین ترک می‌خورد. آلیاژ آلومینیوم–سیلیسیوم نیز مثالی از آلیاژهای حساس به ترک گرم است، مخصوصاً اگر مقدار سیلیسیم کم‌تر از ۰/۵٪ باشد. با توجه به روند رشد دانه‌ها در فلز جوش، احتمال ترک‌خوردگیِ گرم با افزایش نسبت عمق به پهنای جوش بیش‌تر می‌شود. همان‌طورکه شکل ۳-۲٤ نشان می‌دهد، دانه‌های ستونی‌شکل در

---

[1] . Hot cracking
[2] . Cold cracking
[3] . Solidus temperature

جوش‌های عمیق در مرکز جوش به یک‌دیگر می‌رسند و می‌توانند تولید حفره انقباضی یا ترک گرم کنند.



شکل ۳-۲٤. تأثیر نسبت عمق و پهنای جوش بر ترک‌خوردگی گرم.

هنگامی‌که ترک در داخل دانه‌ها پیشروی کرده‌است و نشانه‌ای از تمایل ترک برای رشد در مرزدانه‌ها مشاهده نمی‌شود، به احتمال زیاد ترک از نوع سرد است. ترک سرد در چند صد درجه سانتی‌گراد زیر نقطه انجماد ایجاد می‌شود، و وقوع آن ممکن است حین سرد شدن یا حتی چند هفته بعد از جوشکاری باشد. بررسی ظاهر سطوح ترک (سطح شکست[1]) نیز یکی از روش‌های تمیز ترک گرم و سرد است؛ از آن‌جاکه ترک‌های سرد در دماهای پایین شکل می‌گیرد، سطوح آن به اندازه ترک گرم اکسید نمی‌شود و روشن‌تر است. اگر تنش‌های باقی‌مانده از حد استحکام فلز تجاوز کند، باعث ایجاد ترک می‌شود. ترد شدن ماده در اثر تشکیل ریزساختارهایی مانند مارتنزیت نیز می‌تواند احتمال وقوع ترک سرد را افزایش دهد.

منشأ دیگرِ ترک سرد «تردی هیدروژنی[2]» است. با بالا رفتن دما و به طبعِ آن افزایش حد حلالیت گازها در فلز، مقدار زیادی هیدروژن اتمی در فلز حل می‌شود. منبع این گاز معمولاً رطوبت محیط و مواد است. بخشی از این هیدروژن حین سرد شدن از ساختار اتمی فلز خارج شده و به‌صورت گاز در فلز جوش محبوس و یا از آن خارج می‌شود. اما بخشی از هیدروژن به‌صورت اتمی در ساختار فلز باقی می‌ماند و با مکانیزمی باعث ایجاد ترک می‌شود. بعضی از محققین این مکانیزم را از نوع «ایجاد تنش موضعی» و بعضی دیگر آن را بر پایه

[1] . Fracture surface
[2] . Hydrogen embrittlement

«ایجاد تردی موضعی» می‌دانند. بازرسی جوش آلیاژهای حساس به تردی هیدروژنی باید با تأخیر انجام شود چراکه هیدروژن برای اثر گذاری نیاز به زمان دارد. برای مثال بازرسی نهایی جوش فولادهای HSLA[1] باید حداقل ٤٨ ساعت بعد از اتمام جوشکاری انجام شود.

۳-۸-۱۰. اعوجاج

اگر بزرگی تنش حرارتی در محدوده بین استحکام تسلیم و استحکام نهایی باشد، فلز دچار تغییر شکل مومسان می‌شود. تغییرشکل مومسانِ ناخواسته سازه را اعوجاج می‌گویند که می‌تواند ناشی از تنش حرارتی یا هرگونه تنش خارجی باشد. مواد ترد گاه حتی قبل از تسلیم دچار شکست می‌شوند و هیچ تغییر شکل مومسانی را تجربه نمی‌کنند. اما موادی مانند آلومینیوم استحکام تسلیم کم و شکل‌پذیری بالایی دارند و بسیار مستعد اعوجاج هستند.

واضح است که برای جلوگیری از اعوجاج باید تنش‌های حرارتی را کاهش داد. اما گاه می‌توان با انتخاب مناسب طرح اتصال و ترتیب جوشکاری، تعادلی را در تنش‌های باقی‌مانده و حتی تغییرشکل‌ها ایجاد کرد به‌گونه‌ای که سازه نهایی عاری از هرگونه اعوجاج باشد. برای مثال با پخ دوطرفه و جوشکاری نوبتی در هر دو طرف (شکل ۳-٤)، می‌توان تنش‌ها و اعوجاج ایجادشده توسط هر پاسه را خنثی کرد و از میزان اعوجاج نهایی کاست. به‌عنوان مثالی دیگر می‌توان سازه را در گیره بست و جوشکاری کرد، و سپس اجازه داد تا به دمای محیط برسد. استحکام تسلیم ماده در دمای محیط بیش‌تر است و لذا امکان تغییرشکل مومسان کم‌تر خواهد بود. همچنین می‌توان سازه را به‌همراه گیره در دمای بالا و به‌مدت کافی حرارت‌دهی کرد تا در اصطلاح «تنش‌زدایی[2]» شود. برای مثال تنش‌های باقی‌مانده در یک صفحه از جنس فولاد ساده کربنی و با ضخامت ۲/۵ cm با عملیات حرارتی در محدوده دمای ۵۵۰-٦۵۰ °C و به‌مدت ۱ ساعت برطرف می‌شود.

---

[1] . High-Strength Low-Alloy steel
[2] . Stress relieving

مطالعه بیش‌تر

روش تشخیص و برطرف کردن هر یک از عیوب در جوش را شرح دهید.

۳-۹. نکات ایمنی

۱- اشعه تولیدشده حین جوشکاری با قوس در کوتاه‌مدت باعث خستگی و درد چشم و التهاب پوست می‌شود و در طولانی‌مدت آسیب جدی به آن‌ها وارد می‌کند. در هنگام جوشکاری با قوس از دستکش و ماسک مناسب استفاده نمایید.

۲- در جوش الکترود دستی، از برقراری اتصال کوتاه بین دو قطب منبع خودداری کنید. این کار باعث عبور شدت جریان بسیار بالا از مدار می‌شود و به منبع آسیب می‌زند. چسبیدن الکترود به سطح قطعه کار یکی از موارد اتصال کوتاه است.

۳- سرباره جوش الکترود دستی به‌شدت ترد است و در هنگام ضربه زدن خرد شده و به اطراف پرتاب می‌شود. بنابراین حتماً از عینک محافظ استفاده نمایید. در صورت ورود هرگونه ذره‌ای به چشم، از مالش آن خودداری کنید. در این مواقع بهتر است چشم خود را داخل یک ظرفِ آب تمیز برده و پلک را باز و بسته کنید تا ذره خارج شود.

٤- قبل از شروع قوس از آمادگی اطرافیان که ناظر کار شما هستند مطمئن شوید.

۵- در حفظ و نگه‌داری ابزار دقت نمایید. از جابجا کردن قطعه با دستکش خودداری کنید. برای این کار حتماً از انبر استفاده نمایید. از گذاشتن ماسک، عینک و دیگر ابزار بر روی قطعه داغ خودداری کنید.

٦- در جوشکاری گاز؛ اطراف مخزن، شلنگ‌ها و دیگر تجهیزاتِ اکسیژن عاری از هرگونه روغن، گریس و چربی باشند. این مواد در حضور اکسیژن خالص به‌شدت قابل اشتعال هستند.

۷- در جوشکاری گاز: هرگونه انسداد در نازل، مشعل و لوله می‌تواند خطرآفرین باشد. همچنین شیرها و رگولاتورها باید درست کار کنند. برای جلوگیری از برگشت شعله[1]، یک سری بازدارنده‌ها[2] و شیر چک[3] در نظر گرفته‌شده‌است که آن‌ها نیز باید سالم باشند.

۸- در جوشکاری گاز: اگر تجهیزات ایمنی سالم نباشند، امکان برگشت شعله وجود دارد که بسیار خطرناک است. لذا برای احتیاط بهتر است که هنگام روشن کردن مشعل، ابتدا شیر استیلن را باز کنید، سپس شعله را با فندک جرقه‌زن[4] روشن کرده و در نهایت برای تنظیم شعله به‌تدریج شیر اکسیژن را باز نمایید. به‌هیچ‌عنوان از شعله کبریت یا فندک گازی برای روشن کردن مشعل استفاده نکنید. برای خاموش کردن مشعل، این مراحل را معکوس انجام دهید؛ یعنی ابتدا شیر اکسیژن و سپس شیر استیلن را ببندید. توجه داشته‌باشید که با بستن شیر اکسیژن، طول شعله به‌صورت ناگهانی افزایش می‌یابد.

۳-۱۰. نمونه سؤال

۱- مکانیزم محافظت در جوشکاری مقاومتی چیست؟

۲- در جوشکاریِ یک صفحه ضخیم که احتمال اعواج آن زیاد است، دو نوع پخ را پیشنهاد کنید.

۳- مراحل روشن کردن ایمنِ شعله را در جوشکاری اکسی‌استیلن بنویسید.

٤- دو فشارسنج[5] در رگولاتورِ[6] مخزن گاز چه فشارهایی را نشان می‌دهند؟

۵- در جوشکاری قوسی؛ آلودگی‌های روی سطح علاوه بر ایجاد تخلخل و حفرات، چه مشکلاتی می‌توانند ایجاد کنند؟

٦- پمپ آب در سیستم جوشکاری مقاومتی چه وظیفه‌ای دارد؟

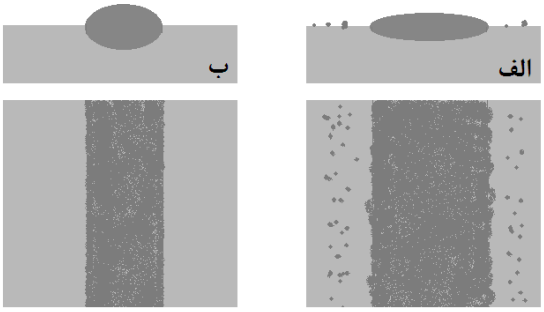
---

[1]. Backfire
[2]. Flashback arrestors
[3]. Check valve
[4]. Flint spark lighter
[5]. Pressure gauge
[6]. Regulator

۷- در جوشکاری الکترود دستی، علت چسبیدن الکترود هنگام روشن کردن قوس بـه روش تماسی چیست؟

۸- در جوشکاری الکترود دستی، از علائم طولِ قوس زیاد که حین جوشکاری و بعـد از آن بروز می‌کند چیست؟ (سه مورد)

۹- برای بررسی اثر طول قوس بر پروفیل جوش و پایداری قوس، با یکسان نگه‌داشتن دیگـر پارامترها، دو خط جوش ایجاد شده‌است (شکل زیر). خط جوش الف و ب را از نظـر میـزان طول قوس مقایسه کرده و چرایی و چگونگی تأثیر طول قوس را بر موارد مذکور بنویسید.



۱۰- انواع شعله اکسی‌استیلن را از نظـر میـزان حـرارت (انـرژی گرمـایی تولیـدی)، درجـه حرارت (دما) و تمرکز حرارتی (ابعاد شعله) مقایسه کنید (با ذکر علل).

۱۱- سه تعریف از قوس ناپایدار و چهار اثر نامطلوب آن را بنویسید.

۱۲- فرمول حرارت ورودی در جوشکاری قوسی را بنویسید، واحد آن را به دست آوریـد و با واحد توان مقایسه کنید.

۱۳- روابط حرارت‌های ورودی و خروجی در جوشکاری مقاومتی را بنویسید و تأثیر اجزای آن را مشخص کنید.

۱٤- اثر شدت جریان بر پایداری قوس و پروفیل جوش (ابعاد و شکل آن) را شرح دهید.

۱۵- در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW)، چه محدودیت‌هایی در انتخاب شدت جریـان و زمان عبور جریان وجود دارد؟

۱۶- در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، عامل اصلی ایجاد جرقه‌ها چیست. برای جلوگیری از آن چه پیشنهادی دارید؟

۱۷- رباتی به‌روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW)، روی بدنه خودرو اتصالاتی ایجاد می‌کند. اگر الکترود آن برای مدت طولانی (برای مثال یک سال) تعویض نشود، انتظار دارید چه تغییری در ظاهر بدنه و همچنین دکمه جوشِ تولیدی توسط آن، ایجاد شود.

۱۸- می‌دانیم با افزایش ضخامت قطعه، مکش حرارتی از محل جوش به درون قطعه افزایش می‌یابد. با توجه به اجزای رابطه‌های نرخِ حرارت تولیدی و خروجی در جوشکاری مقاومتی و خواص فیزیکی‌ای همچون ظرفیت حرارتی، این پدیده را بررسی کنید.

۱۹- در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، در مورد چگونگی ایجاد سه حالتِ الف) بدون جرقه و پاشش، ب) با جرقه جزئی و ج) با پاشش زیاد، توضیح دهید.

۲۰- برای جوشکاری ورق‌های نازک به‌ترتیب کدام یک از فرآیندهای SMAW، OAW و RSW را ترجیح می‌دهید؟ (با ذکر دلیل)

۲۱- تفاوت WPS و PQR چیست؟

۲۱- حرکات سریع، نامنظم و غیریکنواختِ دست جوشکار می‌تواند باعث بروز چه عیوبی شود؟

۲۳- به احتمال زیاد تجربه برش یک هندوانه رسیده را داشته‌اید؛ به محض فرو بردن چاقو دچار ترکی بسیار بزرگ می‌شود. در سازه‌ها نیز ممکن است با کوچک‌ترین نیرو، شکست اتفاق افتد. صرف نظر از خواص ماده، کدام یک از عیوب می‌تواند عامل این رخداد باشد.

۲۴- قطعه‌کار یکی از دانشجویان هنگام جوشکاری دائم به میز کار جوش می‌خورد. برای جلوگیری از آن، چه پیشنهاداتی برای او دارید.

کتابنامه

۱- سید عبدالکریم سجادی، *رفتار مکانیکی مواد*. چاپ دوم، مشهد، ایران: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸٦.

۲- امیرحسین کوکبی، بهروز بیدختی و حامد جمشیدی اول، *تکنولوژی جوشکاری؛ متالورژی*. چاپ اول، تهران، ایران: انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۸.

۳- امیرحسین کوکبی و حامد جمشیدی اول، *تکنولوژی جوشکاری؛ طراحی و بازرسی*. چاپ اول، تهران، ایران: انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۱.

٤- امیرحسین کوکبی و مجید محمودی غزنوی، *تکنولوژی جوشکاری؛ فرآیندها*. چاپ دوم، تهران، ایران: انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۷.

۵- محمدعلی گلعذار، *مبانی و کاربردهای عملیات حرارتی فولادها و چدن‌ها*. اصفهان، ایران: انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۷.

6- T. Altan and A. E. Tekkaya, *Sheet metal forming fundamentals*. Materials park, Ohio, USA: ASM International, 2012.

7- T. Altan and A. E. Tekkaya, *Sheet metal forming processes and applications*. Materials Park, Ohio, USA: ASM International, 2012.

8- V. Boljanovic, *Sheet metal forming processes and die design*. South Norwalk, Connecticut, USA: Industrial Press, 2014.

9- H. J. Dyer, *How to work sheet metal*. Hemel Hempstead, UK: Model and Allied Publications, 1963.

10- Sindo Kou, *Welding metallurgy*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2003.
11- G. E. Linnert, *Welding metallurgy; carbon and alloy steels*. Miami, Florida, USA: American Welding Society, 1994.
12- . J. C. Lippold, *Welding metallurgy and weldability*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, *2015.*
13- D. A. Porter, K. E. Easterling and M. Y. Sherif, *Phase transformations in metals and alloys*. 3rd Edition, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2009.
14- R. E. Wakeford, *Sheet metal work*. Swanley, UK: Argus Books Ltd, 1985.

واژه‌نامه انگلیسی–فارسی

3D printing	چاپگر سه‌بعدی
Acceptance criteria for weld defects	حد پذیرش عیوب جوش
Acetylene feather	بال استیلن
Actual throat	گلوگاه یا گلویی جوش واقعی
Additive manufacturing	تولید فزاینده
Adhesive	چسب
Adhesive force	نیروی چسبندگی
Air Acetylene Welding	جوشکاری هوا استیلن
Alloy	آلیاژ
Alternating Current	جریان متناوب
Aluzinc	آلوزینک
American Iron & Steel Institute	مؤسسه آهن و فولاد آمریکا
American Society for Testing and Materials	انجمن مواد و آزمون آمریکا
American Society of Mechanical Engineers	انجمن مهندسین مکانیک آمریکا
American Welding Society	انجمن جوشکاری آمریکا
Anvil	سندان
Arc	قوس
Arc blow	وزش قوس
Arc length	طول قوس
Arc strike	لکه قوس
Assembling	سوار کردن
Atomic Hydrogen Welding	جوشکاری هیدروژن اتمی
Austenite	آستنیت
Autogenous welding	جوشکاری ذوبی بدون استفاده از پرکننده
Aviation snips	قیچی
Backfire	برگشت شعله
Backhand welding technique	روش جوشکاری پس‌دستی

Bainite	بینایت
Balanced flame	شعله خنثی
Bare Metal Arc Welding	جوشکاری قوسی با الکترود بدون پوشش
Base Metal	فلز پایه
Beam compass	پرگار کشوئی
Bench shear	قیچی اهرمی
Bend Allowance	حد مجاز خم
Bend Deduction	کسری خم
Bevel	پخ
Bevel groove weld	پخ نیم‌جناقی
Billet	شمشال
Blanking	پولک‌زنی
Bloom	شمشه
Box-and-pan brake	ماشین خم‌کن لقمه‌ای
Brake	ماشین خم‌کاری
Brass	برنج
Brazing	لحیم‌کاری سخت
Brittle	ترد
Bronze	برنز
Butt joint	اتصال سربه‌سر یا لب‌به‌لب
Caliper	پرگار انتقال اندازه
Calipers	کولیس
Carbide welding	جوش کاربید
Carbon Arc Welding	جوشکاری قوسی کربنی
Carburizing	کربوره کردن
Carburizing flame	شعله کربن‌زا
Cast iron	چدن
Casting	ریخته‌گری
Cementite	سمنتیت
Check valve	شیر چک
Chemical reaction	واکنش شیمیایی
Chips	براده
Cluster porosity	تخلخل خوشه‌ای
Coating	پوشش
Coextrusion Welding	جوشکاری هم‌فشارکاری

Cohesive force	نیروی هم‌بستگی، نیروی پیوستگی
Cold cracking	ترک‌خوردگی سرد
Cold Pressure Welding	جوشکاری سرد فشاری
Combination square set	گونیای مرکب
Compass	پرگار
Compressed Natural Gas	گاز طبیعی فشرده
Computer Numerical Control	دستگاه CNC
Constant Voltage	مشخصه ولت–آمپر ولتاژ ثابت
Constant-current	مشخصه ولت–آمپر جریان ثابت
Corner joint	اتصال گوشه‌ای
Creep	خزش
Creep deformation	تغییرشکل خزشی
Crystal	بلور
Crystallographic defect	عیب بلوری
Damascus steel	فولاد دمشق
Deep drawing	کشش عمیق
Depth of fusion	عمق ذوب
Deutsches Institut für Normung	مؤسسه استاندارد آلمان
Development	گسترش
Diameter of weld nugget	قطر دکمه جوش
Die	ماتریس
Diffusion	نفوذ
Diffusion Welding	جوشکاری نفوذی
Direct Current	جریان مستقیم
Direct Current Electrode Negative	قطبیت الکترود منفی
Direct Current Electrode Positive	قطبیت الکترود مثبت
Distortion	اعوجاج
Divider	پرگار تقسیم
Double hem	لبه‌برگردان دوتایی
Double lap joint	اتصال دولبه‌روی‌هم
Double strap joint	اتصال با دو وصله
Drag angle	زاویه حرکت در روش پس‌دستی
Drilling	مته‌زنی
Drooping	مشخصه ولت–آمپر سراشیبی
Ductile cast iron	چدن داکتیل

Ductility	شکل پذیری
Duplex	فولاد دوفازی
Edge joint	اتصال پیشانی
Edge joint	اتصال پیشانی یا لبه‌ای
Effective throat	گلوگاه جوش مؤثر
Elastic behaviour	رفتار کشسان
Electrical resistance	مقاومت الکتریکی
ElectroGas Welding	جوشکاری الکتروگازی
Electromagnetic action	اثر الکترومغناطیس
Electron-Beam Welding	جوشکاری پرتو الکترونی
Electroslag Welding	جوشکاری سرباره الکتریکی
Endothermic	گرماگیر
Etching	حکاری
Evolving gas pressure	فشار گاز درحال انبساط
Excessive root penetration	نفوذ اضافه در ریشه جوش
Exothermic	گرمازا
Explosion Welding	جوشکاری انفجاری
Explosive filament evaporation	تبخیر انفجاری رشته
Extrusion	حدیده‌کاری
Fatigue behavior	رفتار خستگی
Ferrite	فریت
Filing	براده
Filler	پرکننده
Fillet weld	جوش نبشی
Finger brake	ماشین خم‌کن لقمه‌ای
Flake graphite	گرافیت تیغه‌ای
Flash Welding	جوشکاری جرقه‌ای
Flashback arrestors	بازدارنده برگشت شعله
Flat	تخت، مشخصه ولت–آمپر تخت
Flint spark lighter	فندک جرقه‌زن
FLOW Welding	جوشکاری گدازی
Flux	روان‌ساز
Flux-Cored Arc Welding	جوشکاری قوسی توپودری
Foil	فویل
Forehand welding technique	روش جوشکاری پیش‌دستی

Forge Welding	جوشکاری پتکه‌ای یا آهنگری
Forging	آهنگری
Formative manufacturing	تولید شکل‌دهنده
Forming	شکل‌دهی
Fracture surface	سطح شکست
Frequency	بسامد
Friction Stir Welding	جوشکاری اصطکاکی تلاطمی
Friction Welding	جوشکاری اصطکاکی
Fusion face	سطح یا رویه پخ
Fusion welding	جوشکاری ذوبی
Gas Metal Arc Welding	جوشکاری الکترود مصرفی با گاز محافظ
Gas Tungsten Arc Welding	جوشکاری الکترود تنگستنی با گاز محافظ
Gauge	سنجه
Grain	دانه
Grain boundary	مرزدانه
Grain structure	دانه‌بندی
Graphite	گرافیت
Grey cast iron	چدن خاکستری
Grinding dust	ذرات سنگ‌زنی
Groove depth	عمق پخ
Groove face	سطح یا رویه ذوب
Groove weld	جوش شیاری
Guillotine	گیوتین
Gunmetal	مفرغ
Hardness	سختی
Heat sink	گرماگیر
Heat-Affected Zone	ناحیه متأثر از حرارت
Hem	لبه‌برگردان
Heterogeneous welding	جوشکاری ذوبی با پرکننده متفاوت از فلز پایه
High-Frequency Resistance Welding	جوشکاری مقاومتی با بسامد بالا
High-Strength Low-Alloy steel	فولاد کم‌آلیاژ استحکام‌بالا
Homogeneous welding	جوشکاری ذوبی با پرکننده هم‌جنس فلز پایه
Horizontal	افقی
Hot cracking	ترک‌خوردگی گرم
Hot Pressure Welding	جوشکاری فشاری گرم

Hydrogen bond	پیوند هیدروژنی
Hydrogen embrittlement	تردی هیدروژنی
Impurity	ناخالصی
Inclusion	آخال
Induction	القا
Induction Welding	جوشکاری القایی
Ingot	شمش
Inner cone	هسته داخلی
Interdiffusion	نفوذ درهم
Inverter	معکوس‌کننده
Inverter welder	دستگاه جوش اینورتر
Inverter welding unit	دستگاه جوش اینورتر
Ionic-covalent bonds	پیوندهای یونی–کووالانسی
Ionisation	یونیزاسیون
Ionization	یونیزاسیون
Joining	اتصال
Lack of fusion	ذوب ناقص
Lack of penetration	نفوذ ناقص
Lap joint	اتصال لبه‌روی‌هم
Laser Beam Welding	جوشکاری لیزر
Lathe	دستگاه تراش
Leading angle	زاویه حرکت در روش پیش‌دستی
Left cut snips	قیچی چپ‌بر
Leftward technique	روش جوشکاری حرکت به‌طرف چپ
Lenz's Law	قانون لنز
Linear Friction Welding	جوشکاری اصطکاکی خطی
Liquefied Petroleum Gas	گاز مایع
Liquidus temperature	نقطه ذوب
Machining	ماشین‌کاری
Macroscopic defects	عیوب درشت
Male and Female	نری–مادگی
Malleability	چکش‌خواری
Malleable cast iron	چدن چکش‌خوار
Mallet	چکش پلاستیکی، چکش با سر چوبی
Mandrel	مندرل

Manual Metal Arc welding	جوش الکترود دستی
Martensite	مارتنزیت
Matte steel	فولاد مات
Mechanical Fastening	بستن مکانیکی
Melt pool	حوضچه جوش، حوضچه ذوب
Metal Active Gas welding	جوشکاری الکترود مصرفی با گاز فعال
Metal chisel	قلم
Metal Inert Gas welding	جوشکاری الکترود مصرفی با گاز خنثی
Metal spinning	شکل‌دهی چرخشی
Metallurgical bonding	اتصال متالورژیکی
Micro-mechanical interlocking	ریزدرگیری‌های مکانیکی
Micrometer	ریزسنج
Microstructure	ریزساختار
Molding	قالب‌گیری
Mole	مول
Monel	مونل
Neutral flame	شعله خنثی
Nickel silver	ورشو
Ni-Hard	نای‌هارد
Nodular graphite	گرافیت کرمی‌شکل
Nondestructive testing	آزمون غیرمخرب
Nozzle	افشانک
Open-Circuit Voltage	ولتاژ مدار باز
Outer envelope	هاله خارجی
OutSide SetBack	عقب‌نشینی خارجی
Overhead	بالای‌سر
Oxidizing flame	شعله اکسیدی
OxyAcetylene Welding	جوشکاری اکسی استیلن
Oxy-fuel cutting	هوابرش، برشکاری هواگاز
OxyHydrogen Welding	جوشکاری اکسی هیدروژن
Partially Melted Zone	منطقه ذوب جزئی
Pearlite	پرلیت
PErcussion Welding	جوشکاری تصادمی الکتریکی
Pewter	مسوار
Phase	فاز

Piercing	دستگاه سوراخ‌زنی، دستگاه پانچ
Pinch effect	اثر پینچ
Pittsburgh seam	پیچک پیتسبورگ
Plasma Arc Welding	جوشکاری قوس پلاسما
Plasma jet	جت پلاسما
Plastic deformation	تغییرشکل مومسان
Plate	صفحه
Post heating	پس‌گرم
Postheat	پس‌گرم
Powder metallurgy	متالورژی پودر
Preheat	پیش‌گرم
Pre-painted galvanised iron	ورق رنگی
Pressure Gas Welding	جوشکاری گاز پرفشار
Pressure gauge	فشارسنج
Procedure Qualification Record	دستورالعمل اجرایی جوش
Projection Welding	جوشکاری پیش‌طرحی
Protractor	نقاله
Punch	سنبه
Punching	دستگاه سوراخ‌زنی، دستگاه پانچ
Push angle	زاویه حرکت در روش پیش‌دستی
Radiation	تابش
Radiographic Testing	آزمون رادیوگرافی
Rasp	سوهان
Rectifier	یکسوکننده
Reducing flame	شعله احیایی
Regulator	رگولاتور
Reinforcement	گرده جوش
Residual stress	تنش باقی‌مانده، تنش پسماند
Resistance SEam Welding	جوشکاری مقاومتی نواری
Resistance Spot Welding	جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای
Resistance Welding	جوشکاری مقاومتی
Reverse polarity	قطبیت معکوس
Reynolds number	عدد رینولدز
Right cut snips	قیچی راست‌بر
Rightward technique	روش جوشکاری حرکت به‌طرف راست

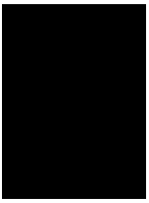
Rivet	پرچ
Roll bender	خم‌کن سه‌غلتکه
Roll Welding	جوشکاری غلتکی
Rolling	نورد
Root face	پاشنه پخ
Rutile	رتیل، اکسید تیتانیوم
Scarf joint	اتصال مفصلی
Scarph joint	اتصال مفصلی
Scriber	سوزن خط‌کش
Seam joint	اتصال پیچک
Segment	بخش
Set square	گونیای مرکب
Shearing	برشکاری
Shears	قیچی
Sheet	ورق
Sheet lamination	لایه‌گذاری ورق
Sheet metal working	ورق‌کاری
Sheet metal bending	خم‌کاری فلزات
Sheet metal bending plier	انبر خم‌کن
Shielded Metal Arc Welding	جوشکاری قوسی با الکترود پوشش‌دار
Shiny steel	فولاد براق
Shunting effect	اثر انحراف جریان
Simple lap joint	اتصال لبه‌روی‌هم ساده
Single hem	لبه‌برگردان تکی
Sintering	تف‌جوشی
Slab	تختال
Slag	سرباره
Soldering	لحیم‌کاری نرم
Soldering iron	هویه
Solid state welding	جوشکاری حالت جامد
Solidus temperature	نقطه انجماد
SolidWorks	نرم‌افزار سالیدوورک
Soot	دوده
Spatter	پاشش، ترشح، جرقه
Spheroidal graphite	گرافیت کروی نامنظم

Springback	برگشت کشسان
Stainless steel	فولاد زنگ‌نزن
Stake	سندان
Steel	فولاد
Stepped	پله‌ای
Stepped lap joint	اتصال لبه‌روی‌هم پله‌ای
Stick welding	جوش الکترود دستی
Straight cut snips	قیچی مستقیم‌بر
Straight polarity	قطبیت مستقیم
Strain	کرنش
Strain hardening	کرنش سختی
Strap	نوار وصله
Strap joint	اتصال با وصله
Stress Corrosion Cracking	ترک خوردگی تنشی
Stress relieving	تنش‌زدایی
Structural materials	مواد سازه‌ای
Stud Welding	جوشکاری زائده‌ای
Submerged Arc Welding	جوشکاری زیرپودری
Subtractive manufacturing	تولیده کاهنده
Surface tension	کشش سطحی
Swarf	براده
Tack welding	خال‌جوش
Tapered	شیب‌دار
Tapered double strap joint	اتصال با دو وصله شیب‌دار
Tapered lap joint	اتصال لبه‌روی‌هم شیب‌دار
Tee joint	جوش سپری
Tee joint	اتصال سپری یا T شکل
Theoretical strength	استحکام نظری
Theoretical throat	گلوگاه جوش نظری
Thermal conduction	هدایت حرارتی
Thermite Welding	جوشکاری احتراقی / جوشکاری ترمیت
Tin snips	قیچی
Tinplate	حلب
Toughness	چقرمگی
Trailing angle	زاویه حرکت در روش پس‌دستی

Transient Liquid Phase	اتصال با فاز مایع گذرا
Travel angle	زاویه حرکت
Truncated cone	مخروط ناقص
T-square	خط‌کش متحرک T
Tungsten Inert Gas welding	جوشکاری الکترود تنگستنی با گاز خنثی
U groove weld	پخ لاله‌ای یا U شکل
Ultimate strength	استحکام نهایی
Ultrasonic Testing	آزمون فراصوتی
Ultrasonic Welding	جوشکاری فشاری سرد
Undercutting	سوختگی کنار جوش
Upset Welding	جوشکاری مقاومتی سربه‌سر
V groove weld	پخ جناقی یا V شکل
Van der waals bond	پیوند واندروالس
Vertical	قائم
Vertical Down	رو به پایین
Vertical Up	رو به بالا
Viscoelastic deformation	تغییرشکل گرانرو–کشسان
Viscoplastic deformation	تغییرشکل گرانرو–مومسان
Viscosity	گرانروی
Volt-ampere characteristic	مشخصه ولت–آمپر
Waterjet cutter	دستگاه برش جت آب
Weld depth	عمق جوش
Weld face	سطح یا رویه جوش
Weld interface	فصل مشترک جوش
Weld leg	ساق جوش
Weld Metal	فلز جوش
Weld nugget	دکمه جوش
Weld pass	پاسه جوش
Weld pool	حوضچه جوش، جوضچه ذوب
Weld root	ریشه جوش
Weld size	اندازه جوش
Weld toe	پنجه جوش
Weld width	پهنای جوش
Weldability	قابلیت جوشکاری
Welding position	وضعیت جوشکاری

Welding Procedure Specification	دستورالعمل فرآیند جوشکاری
Weld-seam width	پهنای نوار جوش
Wettability	ترکنندگی
White cast iron	چدن سفید
White gold	طلای سفید
Wire drawing	کشش سیم
Wired hem	لبه‌برگردان سیمی
Wiring	سیم‌گذاری
Work angle	زاویه کار
Work function	تابع کار
Work hardening	کارسختی
Wormhole porosity	تخلخل کرمی‌شکل
Yield strength	استحکام تسلیم
Young's modulus	مدول کشسان، مدول یانگ

واژه‌نامه فارسی–انگلیسی



اتصال	Joining
اتصال T شکل	Tee joint
اتصال با دو وصله	Double strap joint
اتصال با دو وصله شیب‌دار	Tapered double strap joint
اتصال با فاز مایع گذرا	Transient Liquid Phase
اتصال با وصله	Strap joint
اتصال پیچک	Seam joint
اتصال پیشانی	Edge joint
اتصال دولبه‌روی‌هم	Double lap joint
اتصال سپری	Tee joint
اتصال سربه‌سر	Butt joint
اتصال گوشه‌ای	Corner joint
اتصال لب‌به‌لب	Butt joint
اتصال لبه‌ای	Edge joint
اتصال لبه‌روی‌هم	Lap joint
اتصال لبه‌روی‌هم پله‌ای	Stepped lap joint
اتصال لبه‌روی‌هم ساده	Simple lap joint
اتصال لبه‌روی‌هم شیب‌دار	Tapered lap joint
اتصال متالورژیکی	Metallurgical bonding
اتصال مفصلی	Scarf joint, scarph joint
اثر الکترومغناطیس	Electromagnetic action
اثر انحراف جریان	Shunting effect
اثر پینچ	Pinch effect
استحکام تسلیم	Yield strength
استحکام نظری	Theoretical strength
استحکام نهایی	Ultimate strength
اعوجاج	Distortion

افشانک	Nozzle
افقی	Horizontal
القا	Induction
انبر خم‌کن	Sheet metal bending plier
انجمن جوشکاری آمریکا	American Welding Society
انجمن مهندسین مکانیک آمریکا	American Society of Mechanical Engineers
انجمن مواد و آزمون آمریکا	American Society for Testing and Materials
اندازه جوش	Weld size
آخال	Inclusion
آزمون رادیوگرافی	Radiographic Testing
آزمون غیرمخرب	Nondestructive testing
آزمون فراصوتی	Ultrasonic Testing
آستنیت	Austenite
آلوزینک	Aluzinc
آلیاژ	Alloy
آهنگری	Forging
بازدارنده برگشت شعله	Flashback arrestors
بال استیلن	Acetylene feather
بالای‌سر	Overhead
بخش	Segment
براده	Chips, swarf, filing
برشکاری	Shearing
برشکاری هواگاز	Oxy-fuel cutting
برگشت شعله	Backfire
برگشت کشسان	Springback
برنج	Brass
برنز	Bronze
بسامد	Frequency
بستن مکانیکی	Mechanical Fastening
بلور	Crystal
بینایت	Bainite
پاسه جوش	Weld pass
پاشش	Spatter
پاشنه پخ	Root face
پخ	Bevel

پخ U شکل	U groove weld
پخ V شکل	V groove weld
پخ جناقی	V groove weld
پخ لاله‌ای	U groove weld
پخ نیم‌جناقی	Bevel groove weld
پرچ	Rivet
پرکننده	Filler
پرگار	Compass
پرگار انتقال اندازه	Caliper
پرگار تقسیم	Divider
پرگار کشوئی	Beam compass
پرلیت	Pearlite
پس‌گرم	Postheat, post heating
پله‌ای	Stepped
پنجه جوش	Weld toe
پهنای جوش	Weld width
پهنای نوار جوش	Weld-seam width
پوشش	Coating
پولک‌زنی	Blanking
پیچک پیتسبورگ	Pittsburgh seam
پیش‌گرم	Preheat
پیوند هیدروژنی	Hydrogen bond
پیوند واندروالس	Van der waals bond
پیوندهای یونی–کووالانسی	Ionic-covalent bonds
تابش	Radiation
تابع کار	Work function
تبخیر انفجاری رشته	Explosive filament evaporation
تخت	Flat
تختال	Slab
تخلخل خوشه‌ای	Cluster porosity
تخلخل کرمی‌شکل	Wormhole porosity
ترد	Brittle
تردی هیدروژنی	Hydrogen embrittlement
ترشح	Spatter
ترک خوردگی تنشی	Stress Corrosion Cracking

ترک‌خوردگی سرد	Cold cracking
ترک‌خوردگی گرم	Hot cracking
ترکنندگی	Wettability
تغییرشکل خزشی	Creep deformation
تغییرشکل گرانرو–کشسان	Viscoelastic deformation
تغییرشکل گرانرو–مومسان	Viscoplastic deformation
تغییرشکل مومسان	Plastic deformation
تف‌جوشی	Sintering
تنش باقی‌مانده	Residual stress
تنش پسماند	Residual stress
تنش‌زدایی	Stress relieving
تولید شکل‌دهنده	Formative manufacturing
تولید فزاینده	Additive manufacturing
تولیده کاهنده	Subtractive manufacturing
جت پلاسما	Plasma jet
جرقه	Spatter
جریان متناوب	Alternating Current
جریان مستقیم	Direct Current
جوش الکترود دستی	Manual metal arc welding, stick welding
جوش سپری	Tee joint
جوش شیاری	Groove weld
جوش کاربید	Carbide welding
جوش نبشی	Fillet weld
جوشکاری اصطکاکی	Friction Welding
جوشکاری اصطکاکی تلاطمی	Friction Stir Welding
جوشکاری اصطکاکی خطی	Linear Friction Welding
جوشکاری اکسی استیلن	OxyAcetylene Welding
جوشکاری اکسی هیدروژن	OxyHydrogen Welding
جوشکاری القایی	Induction Welding
جوشکاری الکترود تنگستنی با گاز خنثی	Tungsten Inert Gas welding
جوشکاری الکترود تنگستنی با گاز محافظ	Gas Tungsten Arc Welding
جوشکاری الکترود مصرفی با گاز خنثی	Metal Inert Gas welding
جوشکاری الکترود مصرفی با گاز فعال	Metal Active Gas welding
جوشکاری الکترود مصرفی با گاز محافظ	Gas Metal Arc Welding
جوشکاری الکتروگازی	ElectroGas Welding

جوشکاری انفجاری	Explosion Welding
جوشکاری پتکه‌ای یا آهنگری	Forge Welding
جوشکاری پرتو الکترونی	Electron-Beam Welding
جوشکاری پیش‌طرحی	Projection Welding
جوشکاری ترمیت	Thermite Welding / exothermic welding / CADWELD
جوشکاری تصادمی الکتریکی	PErcussion Welding
جوشکاری جرقه‌ای	Flash Welding
جوشکاری حالت جامد	Solid state welding
جوشکاری ذوبی	Fusion welding
جوشکاری ذوبی با پرکننده متفاوت از فلز پایه	Heterogeneous welding
جوشکاری ذوبی با پرکننده هم‌جنس فلز پایه	Homogeneous welding
جوشکاری ذوبی بدون استفاده از پرکننده	Autogenous welding
جوشکاری زائده‌ای	Stud Welding
جوشکاری زیرپودری	Submerged Arc Welding
جوشکاری سرباره الکتریکی	Electroslag Welding
جوشکاری سرد فشاری	Cold Pressure Welding
جوشکاری غلتکی	Roll Welding
جوشکاری فشاری سرد	Ultrasonic Welding
جوشکاری فشاری گرم	Hot Pressure Welding
جوشکاری قوس پلاسما	Plasma Arc Welding
جوشکاری قوسی با الکترود بدون پوشش	Bare Metal Arc Welding
جوشکاری قوسی با الکترود پوشش‌دار	Shielded Metal Arc Welding
جوشکاری قوسی توپودری	Flux-Cored Arc Welding
جوشکاری قوسی کربنی	Carbon Arc Welding
جوشکاری گاز پرفشار	Pressure Gas Welding
جوشکاری گدازی	FLOW Welding
جوشکاری لیزر	Laser Beam Welding
جوشکاری مقاومتی	Resistance Welding
جوشکاری مقاومتی با بسامد بالا	High-Frequency Resistance Welding
جوشکاری مقاومتی سربه‌سر	Upset Welding
جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای	Resistance Spot Welding
جوشکاری مقاومتی نواری	Resistance SEam Welding
جوشکاری نفوذی	Diffusion Welding
جوشکاری هم‌فشارکاری	Coextrusion Welding
جوشکاری هوا استیلن	Air Acetylene Welding

جوشکاری هیدروژن اتمی	Atomic Hydrogen Welding
چاپگر سه‌بعدی	3D printing
چدن	Cast iron
چدن چکش‌خوار	Malleable cast iron
چدن خاکستری	Grey cast iron
چدن داکتیل	Ductile cast iron
چدن سفید	White cast iron
چسب	Adhesive
چقرمگی	Toughness
چکش پلاستیکی	Mallet
چکش‌خواری	Malleability
حد پذیرش عیوب جوش	Acceptance criteria for weld defects
حد مجاز خم	Bend Allowance
حدیده‌کاری	Extrusion
حکاری	Etching
حلب	Tinplate
حوضچه جوش	Melt pool, weld pool
حوضچه ذوب	Melt pool, weld pool
خال‌جوش	Tack welding
خزش	Creep
خط‌کش متحرک T	T-square
خم‌کاری فلزات	Sheet metal bending
خم‌کن سه‌غلتکه	Roll bender
دانه	Grain
دانه‌بندی	Grain structure
دستگاه CNC	Computer Numerical Control
دستگاه برش جت آب	Waterjet cutter
دستگاه تراش	Lathe
دستگاه جوش اینورتر	Inverter welding unit or inverter welder
دستگاه سوراخ‌زنی	Punching, piercing
دستورالعمل اجرایی جوش	Procedure Qualification Record
دستورالعمل فرآیند جوشکاری	Welding Procedure Specification
دکمه جوش	Weld nugget
دوده	Soot
ذرات سنگ‌زنی	Grinding dust

ذوب ناقص	Lack of fusion
رتیل، اکسید تیتانیوم	Rutile
رفتار خستگی	Fatigue behavior
رفتار کشسان	Elastic behaviour
رگولاتور	Regulator
رو به بالا	Vertical Up
رو به پایین	Vertical Down
روان‌ساز	Flux
روش جوشکاری پس‌دستی	Backhand welding technique
روش جوشکاری پیش‌دستی	Forehand welding technique
روش جوشکاری حرکت به‌طرف چپ	Leftward technique
روش جوشکاری حرکت به‌طرف راست	Rightward technique
ریخته‌گری	Casting
ریزدرگیری‌های مکانیکی	Micro-mechanical interlocking
ریزساختار	Microstructure
ریزسنج	Micrometer
ریشه جوش	Weld root
زاویه حرکت	Travel angle
زاویه حرکت در روش پس‌دستی	Trailing angle, drag angle
زاویه حرکت در روش پیش‌دستی	Leading angle, push angle
زاویه کار	Work angle
ساق جوش	Weld leg
سختی	Hardness
سرباره	Slag
سطح شکست	Fracture surface
سطح یا رویه پخ	Groove face, fusion face
سطح یا رویه جوش	Weld face
سطح یا رویه ذوب	Groove face, fusion face
سمنتیت	Cementite
سنبه	Punch
سنجه	Gauge
سندان	Anvil, stake
سوار کردن	Assembling
سوختگی کنار جوش	Undercutting
سوزن خط‌کش	Scriber

سوهان	Rasp
سیم‌گذاری	Wiring
شعله احیایی	Reducing flame
شعله اکسیدی	Oxidizing flame
شعله خنثی	Neutral flame, balanced flame
شعله کربن‌زا	Carburizing flame
شکل پذیری	Ductility
شکل‌دهی	Forming
شکل‌دهی چرخشی	Metal spinning
شمش	Ingot
شمشال	Billet
شمشه	Bloom
شیب‌دار	Tapered
شیر چک	Check valve
صفحه	Plate
طلای سفید	White gold
طول قوس	Arc length
عدد رینولدز	Reynolds number
عقب‌نشینی خارجی	OutSide SetBack
عمق پخ	Groove depth
عمق جوش	Weld depth
عمق ذوب	Depth of fusion
عیب بلوری	Crystallographic defect
عیوب درشت	Macroscopic defects
فاز	Phase
فریت	Ferrite
فشار گاز درحال انبساط	Evolving gas pressure
فشارسنج	Pressure gauge
فصل مشترک جوش	Weld interface
فلز پایه	Base Metal
فلز جوش	Weld Metal
فندک جرقه‌زن	Flint spark lighter
فولاد	Steel
فولاد براق	Shiny steel
فولاد دمشق	Damascus steel

فولاد دوفازی	Duplex
فولاد زنگ‌نزن	Stainless steel
فولاد کم‌آلیاژ استحکام‌بالا	High-Strength Low-Alloy steel
فولاد مات	Matte steel
فویل	Foil
قابلیت جوشکاری	Weldability
قالب‌گیری	Molding
قانون لنز	Lenz's Law
قائم	Vertical
قطبیت الکترود مثبت	Direct Current Electrode Positive
قطبیت الکترود منفی	Direct Current Electrode Negative
قطبیت مستقیم	Straight polarity
قطبیت معکوس	Reverse polarity
قطر دکمه جوش	Diameter of weld nugget
قلم	Metal chisel
قوس	Arc
قیچی	Tin snips, aviation snips, shears
قیچی اهرمی	Bench shear
قیچی چپ‌بر	Left cut snips
قیچی راست‌بر	Right cut snips
قیچی مستقیم‌بر	Straight cut snips
کارسختی	Work hardening
کربوره کردن	Carburizing
کرنش	Strain
کرنش سختی	Strain hardening
کسری خم	Bend Deduction
کشش سطحی	Surface tension
کشش سیم	Wire drawing
کشش عمیق	Deep drawing
کولیس	Calipers
گاز طبیعی فشرده	Compressed Natural Gas
گاز مایع	Liquefied Petroleum Gas
گرافیت	Graphite
گرافیت تیغه‌ای	Flake graphite
گرافیت کرمی‌شکل	Nodular graphite

گرافیت کروی نامنظم	Spheroidal graphite
گرانروی	Viscosity
گرده جوش	Reinforcement
گرمازا	Exothermic
گرماگیر	Heat sink
گرماگیر	Endothermic
گسترش	Development
گلوگاه جوش مؤثر	Effective throat
گلوگاه جوش نظری	Theoretical throat
گلوگاه جوش واقعی	Actual throat
گلویی جوش واقعی	Actual throat
گونیای مرکب	Combination square set
گونیای مرکب	Set square
گیوتین	Guillotine
لایه‌گذاری ورق	Sheet lamination
لبه‌برگردان	Hem
لبه‌برگردان تکی	Single hem
لبه‌برگردان دوتایی	Double hem
لبه‌برگردان سیمی	Wired hem
لحیم‌کاری سخت	Brazing
لحیم‌کاری نرم	Soldering
لکه قوس	Arc strike
ماتریس	Die
مارتنزیت	Martensite
ماشین خم‌کاری	Brake
ماشین خم‌کن لقمه‌ای	Finger brake / box-and-pan brake
ماشین‌کاری	Machining
متالورژی پودر	Powder metallurgy
مته‌زنی	Drilling
مخروط ناقص	Truncated cone
مدول کشسان	Young's modulus
مدول یانگ	Young's modulus
مرزدانه	grain boundary
مسوار	Pewter
مشخصه ولت–آمپر	Volt-ampere characteristic

مشخصه ولت–آمپر تخت	Flat
مشخصه ولت–آمپر سراشیبی	Drooping
مشخصه ولت–آمپر ولتاژ ثابت	Constant Voltage
مشخصه ولت–آمپر جریان ثابت	Constant-current
معکوس‌کننده	Inverter
مفرغ	Gunmetal
مقاومت الکتریکی	Electrical resistance
مندرل	Mandrel
منطقه ذوب جزئی	Partially Melted Zone
مواد سازه‌ای	Structural materials
مول	Mole
مونل	Monel
مؤسسه استاندارد آلمان	Deutsches Institut für Normung
مؤسسه آهن و فولاد آمریکا	American Iron & Steel Institute
ناحیه متأثر از حرارت	Heat-Affected Zone
ناخالصی	Impurity
نای‌هارد	Ni-Hard
نرم‌افزار سالیدوورک	SolidWorks
نری–مادگی	Male and Female
نفوذ	Diffusion
نفوذ اضافه در ریشه جوش	Excessive root penetration
نفوذ درهم	Interdiffusion
نفوذ ناقص	Lack of penetration
نقاله	Protractor
نقطه انجماد	Solidus temperature
نقطه ذوب	Liquidus temperature
نوار وصله	Strap
نورد	Rolling
نیروی پیوستگی	Cohesive force
نیروی چسبندگی	Adhesive force
نیروی هم‌بستگی	Cohesive force
هاله خارجی	Outer envelope
هدایت حرارتی	Thermal conduction
هسته داخلی	Inner cone
هوابرش	Oxy-fuel cutting

هویه	Soldering iron
واکنش شیمیایی	Chemical reaction
ورشو	Nickel silver
ورق	Sheet
ورق رنگی	Pre-painted galvanised iron
ورق‌کاری	Sheet metal working
وزش قوس	Arc blow
وضعیت جوشکاری	Welding position
ولتاژ مدار باز	Open-Circuit Voltage
یکسوکننده	Rectifier
یونیزاسیون	Ionization, ionisation

Welding and Sheet Metal Working Workshop

Dr. M. Fakouri Hasanabadi

9 786226 324267

parsianpub.com
انتشارات پارسیان