جوش قوسی در ورق‌های فولادی سبک

طبق گزارش موسسه آهن و فولاد آمریکا (AISI)، فولادهای سبک نورد سرد، امروزه بیش از ۴۵ درصد فولاد بازار ساخت و ساز را در بر می‌گیرند. برای ساخت و ساز نسبتاً سبک مانند آپارتمان‌ها و خانه‌های مسکونی، اعضای فولادی نورد سرد جایگزین سازگارتری برای محیط زیست نسبت به چوب هستند، چرا که چوب در معرض انقباض، تاب برداشتن و موریانه‌ها قرار دارد. کف، دیوار و سقف ممکن است متشکل از فولاد نورد سرد یا ترکیبی از آن باشد. در صنعت بزرگراه، ورق فولادی با ابعاد کوچک در آب گذرها، گارد ریل‌ها، موانع و علائم میانی استفاده می‌شود. در ساختمان‌های سنتی فولادی سنگین وزن، ورق فولادی اغلب نگه‌دارنده دال‌های بتنی است. با توجه به کاربردهای گسترده این مواد، آمار AISI تعجب آور نیست.

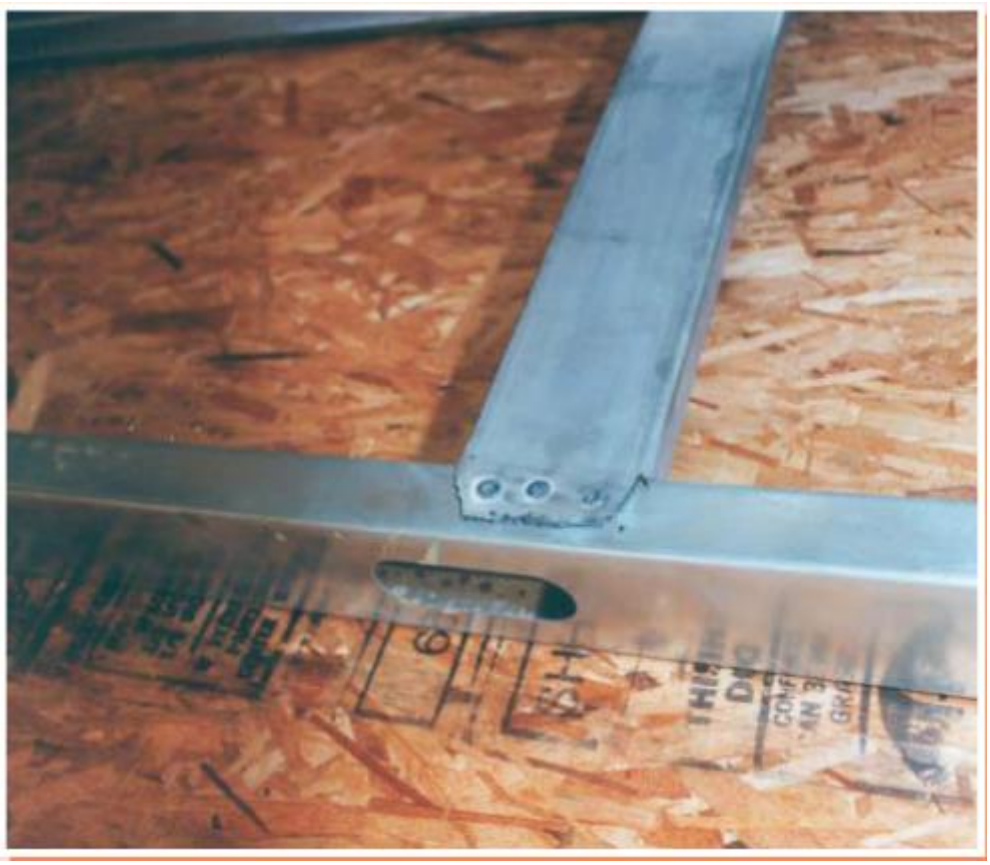
در مقابله با قطعات فولادی سبک ممکن است این‌گونه تصور شود که استفاده از این قطعات حساسیت و دقت به خصوصی نیاز ندارد، اما این تصور بسیار دور از واقعیت است. برای مثال قفسه‌های نگهداری مواد که معمولاً از مواد نورد سرد ساخته می‌شوند و سازه‌های محافظت شده توسط ورق‌های توری شکل را در نظر بگیرید. گارد ریل‌های بزرگراه‌ها نقش واضحی در تأمین ایمنی ایفا می‌کنند. عناصر ساختمانی مانند مصالح، تنگ‌ها و مهار بندها وظایف حیاتی دارند. سیستم‌های قاب فضا کار که از فولاد نورد سرد ساخته می‌شوند، با وجود وزن کم، سیستم سقف قوی را ایجاد می‌کنند. ظاهر فولاد سبک، نباید یک رفتار اتفاقی را در عملکرد حیاتی این اعضا ایجاد کند.

هر کجا فولاد پیدا شود، معمولاً جوشکاری نیز وجود دارد و ساخت و ساز با فولاد نورد سرد نیز از این قضیه مستثنا نیست. با این حال، شباهت‌های بین جوشکاری اشکال ساخته شده با نورد گرم و نورد سرد تا حدودی مانند نسبت شیر به گربه خانگی است: ممکن است هر دو آن‌ها مو دار و زرد باشند (اشاره به شباهت گربه و شیر)، اما تفاوت آن‌ها بیشتر از شباهت‌ها است. نه تنها فرایندها و تکنیک‌های جوشکاری برای اتصال مواد نازک‌تر مختلف هستند، بلکه آیین‌نامه‌های قابل استفاده، اتصالات جوشی، انواع جوش و ماهیت مشکلات بالقوه نیز متفاوت می‌باشند.

جوشکاری چنین فلزهای سبک نیز نباید «غیر حساس» در نظر گرفته شود. درست مثل همتایان خود در فولادهای سنگین، جوش‌هایی که قطعات ورق فولادی را به هم متصل می‌کنند، مهم هستند و ممکن است برای عملکرد سیستم حیاتی باشند.

آیین‌نامه‌ها

ساخت و ساز سنتی سازه‌های فولادی با اشکال بال پهن نورد گرم، معمولاً توسط الزامات طراحی ساختمان‌های اسکلت فلزی مربوط به موسسه ساخت و ساز فولادی آمریکا (AISC) پوشش داده می‌شوند. هنگامی که در سازه از اعضای فولادی نورد سرد استفاده می‌شود، پروژه معمولاً در حوزه الزامات AISI در خصوص طراحی اعضای فلزی نورد سرد قرار می‌گیرد. به طور مشابه، جوشکاری فولاد سازه‌ای نورد سرد معمولاً تحت پوشش آیین نامه جوش سازه‌ای انجمن جوش آمریکا (AWS) بخش D۱,۱ قرار دارد، در حالی که ورق فولادی با الزامات آیین نامه AWS بخش D۱,۳ پوشش داده می‌شود. D۱,۱ به این صورت است «برای استفاده در فولادهایی با ضخامت کمتر از یک هشتم اینچ [۳ میلی متر] در نظر گرفته نشده است ...» (۲۰۰۴ - D۱,۱، پاراگراف ۱ - ۲) در حالی که D۱,۳ «... جوشکاری قوسی ورق یا نوار فولادی سازه‌ای، قطعات نورد سردی را پوشش می‌دهد که برابر یا کمتر از سه شانزدهم اینچ (۰,۱۸۸ اینچ یا ۴,۸ میلی متر) ضخامت اسمی داشته باشند.» (۹۸ - D۱,۳، پاراگراف ۱ - ۱).

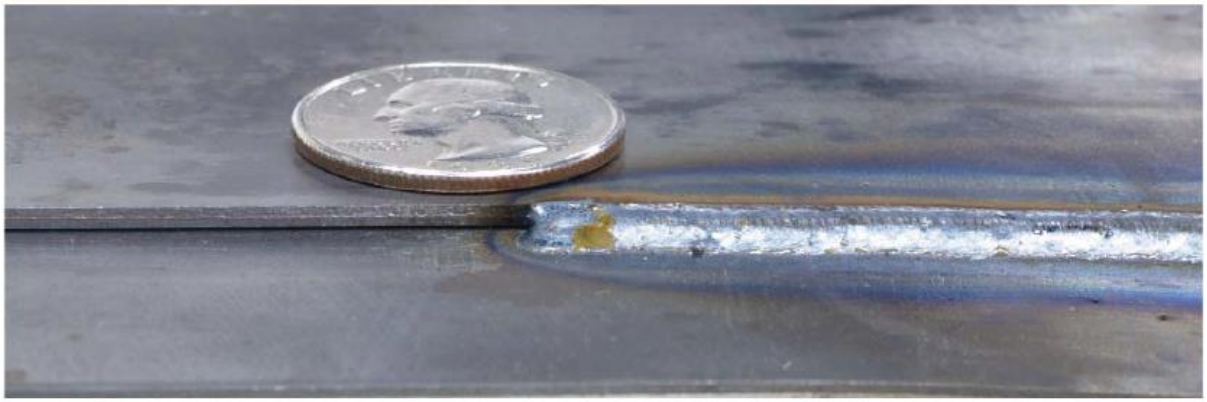


شکل ۱: جوش‌های انگشتانه در ساخت و ساز ورق‌های فولادی معمول هستند، اما استفاده آن‌ها در فولادهای سازه‌ای سنگین محدود شده است.

D۱,۳ به طور خاص برای رسیدگی به فرایندهای جوشکاری، اتصالات، انواع جوش، مواد و جزئیات دیگر مرتبط با جوش و اعضای نازک‌تر تدوین شد. برای مثال، هنگام جوشکاری بر روی مواد سنگین، چالش جوشکار در رسیدن به ذوب مطلوب است به طوری که یک جوش مقاوم حاصل شود. هنگام جوشکاری ورق فولادی، بزرگ‌ترین چالش جوشکار جلوگیری از ذوب فلز پایه است. بر این اساس، D۱,۳ آزمون‌های تعیین صلاحیت مناسبی را تعیین نموده است که مهارت‌های مورد نیاز برای این نوع کار را اندازه گیری می‌کنند. به طور مشابه، اتصالات و جوش‌هایی که احتمال استفاده در ساخت و ساز ورق فولادی دارند، در D۱,۳ آورده شده‌اند.

یک همپوشانی عمدی در ضخامت فولادهای موجود در هر دو آیین نامه وجود دارد: هر دو آیین نامه طیفی از یک هشتم تا سه شانزدهم اینچ (۳ تا ۴,۸ میلی متر) را شامل می‌شوند. در حالی که این همپوشانی سردرگمی‌هایی را در طول سال‌ها سبب شده است، مزیت آن در استفاده از یک کد برای پوشش کل پروژه است. برای مثال، اگر ضخامت تمام فولادهایی که قرار است در یک سازه جوش داده شوند برابر یک هشتم و بزرگ‌تر باشد، D۱,۱ به تنهایی می‌تواند برای اداره کل پروژه مورد استفاده قرار گیرد. به طور مشابه، اگر همه قطعات کوچک‌تر از سه شانزدهم اینچ باشند، تنها D۱,۳ مورد نیاز خواهد بود.

در برخی موارد، قطعات نازک به قطعات ضخیم متصل می‌شوند. شاید معمول‌ترین استفاده از چنین حالتی، در ورق فولادی مصالح کف سازی جوش داده شده به تیرهای فولادی سازه‌ای پشتیبان می‌باشد. در چنین مواردی، الزامات اجرایی هر دو آیین نامه D۱,۱ و D۱,۳ برای اطمینان از حصول کیفیت لازم استفاده می‌شوند.



شکل ۲: جوش قوسی فلزی گازی می‌تواند برای ایجاد جوش با کیفیت بالا در ورق‌های فولادی استفاده شود.

مشخص کردن استانداردهای مناسب برای یک پروژه از اهمیت بالایی برخوردار است. در طول سالیان، مشخصات پروژه‌های بسیاری برای جوشکاری ورق فولادی مطابق با آیین نامه D1,1 بوده است. برای مثال فرض کنید که پروژه واقعی شامل قطعات شماره ۱۶ (۰,۰۵۹۸ اینچ یا ۱,۵۱۹ میلی متر) باشد. کوچک‌ترین آزمون تعیین صلاحیت جوشکاری استاندارد در D1,1، یک صفحه آزمایش با ضخامت سه هشتم اینچ است و زمانی که این مورد با موفقیت جوش داده شود، اپراتور می‌تواند روی مصالحی با حداقل ضخامت یک هشتم و حداکثر ضخامت سه هشتم اینچ جوشکاری کند (به آیین نامه D1,1 جدول ۴-۱۰ مراجعه کنید). بدیهی است که این مورد محدوده استفاده از ورق شماره ۱۶ را پوشش نمی‌دهد. برای رفع این مشکل، پیمانکاران از آزمون صفحه یک اینچی استفاده می‌کنند که برای ضخامت‌های نامحدود استفاده می‌شود. شاید این رویکرد مطابق با متن الزامات درج شده باشد، اما مهارت‌های مورد نیاز برای جوشکاری در صفحه یک اینچی کاملاً با مواردی که برای جوشکاری در ورق فولادی شماره ۱۶ نیاز هستند، نامرتبط می‌باشد.

کاری که باید صورت بگیرد آسان است: کد جوشکاری مناسب را انتخاب کنید. با استفاده از آیین نامه D1,3، جوشکار برای دارا بودن شرایط جوشکاری روی ضخامت فولاد استفاده شده در تولید و یا روی ورق فولادی شماره ۱۶ (اجازه جوشکاری روی ورق معیار شماره ۱۸ و نازک‌تر) و یا روی ورق فولادی شماره ۱۰ (اجازه جوشکاری روی ورق معیار شماره ۱۶ و یا ضخیم‌تر)، حق انتخاب دارد. در تمام موارد، استفاده از آزمون تعیین صلاحیت مناسب است.

انواع جوش

جوش استفاده شده در ورق فولادی با ابعاد کوچک از همتایان خود در فولاد سنگین متفاوت است و معیارهای طراحی برای چنین جوش‌هایی نیز متفاوت می‌باشد. در مصالح با ضخامت کوچک، اتصالات لب به لب اغلب جوش شیاری گوشه مربعی (edge groove welds Square) داده می‌شوند، در حالی که فولاد سنگین اغلب نوعی آماده سازی قبل از جوش شیاری (مانند پخ زدن) خواهد داشت. جوش‌های شیاری وی شکل و نیم جناغی اغلب در استفاده از فولاد سرد شایع هستند، چرا که گوشه‌ها شکل یک شیار طبیعی به خود می‌گیرند، در حالی که هنگام سروکار داشتن با اشکال و صفحات ضخیم چنین جزئیاتی به ندرت یافت می‌شوند. در اتصالات دارای هم پوشانی در فولاد سنگین یا سبک، یک جوش انگشتانه از طریق یک سوراخ در عضو ایجاد می‌شود. چنین جوش‌هایی به ندرت در صفحات سنگین استفاده می‌شوند، اما در ساخت و ساز ورق فولادی رایج هستند (به شکل ۱ نگاه کنید). جوش گودال که معمولاً برای اتصال مصالح کف سازی به فولاد پشتیبان استفاده می‌شود، با ذوب ورق فولادی و آمیخته شدن به فولاد سنگین‌تر زیرین ایجاد می‌شود.

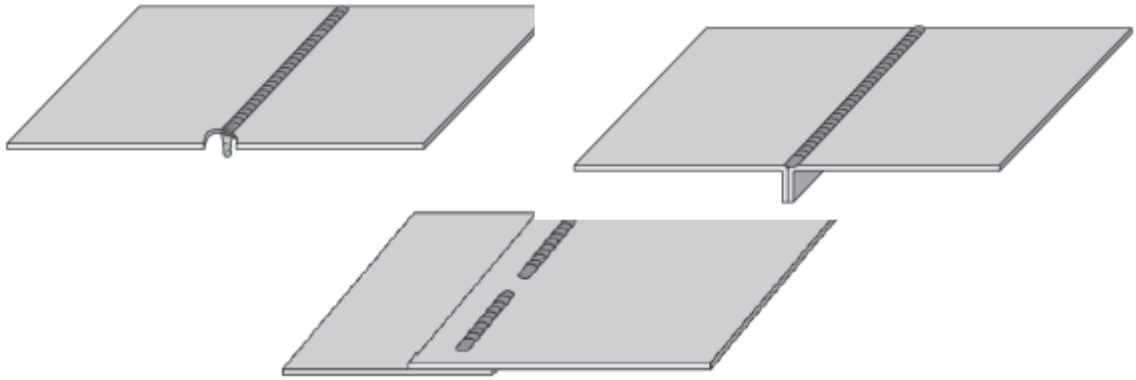
شکل ۳: ترکیبات منبع نیرو تغذیه کننده سیمی ۱۲۰ ولتی قابل حمل کوچک ممکن است سبک به نظر برسد، اما هنگامی که توسط یک تولید کننده قابل اطمینان تولید شده باشد می‌تواند به طور ایده آل برای جوش کاری روی مصالح با ابعاد کوچک حتی در کاربردهای سازه‌ای استفاده شود.

هم فولاد سنگین و هم ورق‌های فولادی می‌توانند با جوش گوشه به هم متصل شوند. با این حال، اساس طراحی برای دو مورد متفاوت است: برای جوش‌های گوشه موجود در D۱,۱، گلویی به عنوان المان کنترل کننده فرض می‌شود و ظرفیت اتصال تا حدی وابسته به مقاومت فلز جوش رسوب کننده، دارد. در مورد ورق‌های فولادی، D۱,۳ فرض می‌کند که ظرفیت اتصال توسط مقاومت ورق فولاد تعیین می‌شود. به عنوان یک نتیجه، مقاومت ورق فولادی است که در محاسبات طراحی استفاده می‌شود نه مقاومت فلز جوش رسوب کننده. همین فلسفه در جوش‌های شیاری وی شکل و مورب و همچنین جوش‌های نقطه قوس (گودال) اعمال می‌شود. این رویکرد هم با تحقیق و هم تجربه ثابت شده است: در حالت حدی، اتصالات قطعات نازک معمولاً با کشیده شدن جوش به خارج از فلز پایه شکسته می‌شوند.

فرایندهای جوشکاری

در حال حاضر، جای تعجب ندارد که فرآیندها و تکنیک‌های مناسب جوشکاری روی ورق فولادی ممکن است کاملاً متفاوت از جوشکاری اشکال سنگین باشد. در حالی که جوش قوس فلزی با الکترود پوشش دار (SMAW) می‌تواند در کاربردهای با ابعاد کوچک با استعمال الکترود با قطر کوچک‌تر و جریان جوشکاری پایین استفاده شود، امروز بسیاری از پیمانکاران فرایندهای جوشکاری نیمه اتوماتیک آسان‌تر را برای استفاده انتخاب می‌کنند. با این حال، نمونه کاربردی از جوشکاری SMAW پایدار در ورق فولادی، جوشی است که مصالح کف سازی را به فولاد نگه دارنده متصل می‌کند. در اینجا، سادگی، قابلیت حمل و ظرفیت جوش SMAW روند انتخاب را تعیین می‌کنند. الکترودهای کلاس E۶۰۲۲ طبق آیین نامه AWS معمولاً به دلیل قابلیت ضربه خوری مجدد و ویژگی‌های نفوذ عمیق آن‌ها استفاده می‌شوند.

با این حال، در دیگر برنامه‌های کاربردی، نفوذ عمیق دشمن جوشکار است. در اینجا فرآیندهای نیمه اتوماتیک واقعاً می‌توانند خود را نشان دهند: با استفاده از الکترود با قطر کوچک‌تر (مانند ۰,۰۳۵ اینچ و ۰,۰۴۵ اینچ)، جوشکاری ورق فولادی هرگز آسان‌تر از این نبوده است (به شکل ۲ مراجعه کنید). دو نوع از رایج‌ترین فرایندهای استفاده شده، جوشکاری با گاز محافظ (GMAW) و جوشکاری قوسی با مفتول تو پودری (FCAW) هستند. هر دو روش فرایندهای «جوشکاری با سیم» هستند. GMAW از یک الکترود فولادی سخت استفاده می‌کند و همیشه یک گاز محافظ برای حوضچه مذاب بکار می‌گیرد. دو نوع روش برای FCAW وجود دارد: گاز محافظ و خود محافظ. روش گاز محافظ FCAW بسیار شبیه به GMAW است، با این تفاوت که یک فلز پر کننده لوله‌ای شکل استفاده می‌شود. در داخل الکترود ذرات گداختگی وجود دارند که به همراه گاز، از حوضچه جوش محافظت می‌کنند. روش خود محافظ، به طور مشابه با استفاده از یک الکترود تو پودری صورت می‌گیرد اما هیچ گاز محافظی نیاز نیست. این باعث می‌شود که روش خود محافظ FCAW، قابل حمل تر و برای شرایط بادی مناسب‌تر باشد.



شکل ۴: ایجاد جوش‌های با کیفیت روی اتصالات لب به لب گوشه مربعی در ورق‌های فلزی دشوار است، اما اتصالات دارای هم پوشانی معمولاً گزینه‌های قابل قبولی هستند. اتصالات روی هم امکان استفاده از جوش‌های کام را مقدور می‌سازند. یک لبه پخ زده شده ممکن است اتصال را سخت کند و ایجاد جوش مورب (V شکل) معمولاً نسبت به جوش لب به لب مربعی آسان‌تر می‌گردد.

در آیین نامه D۱,۱، یک حالتی از انتقال فلز با GMAW به طور انحصاری محدود شده است: امکان استفاده از انتقال اتصال کوتاه وجود ندارد مگر اینکه الزامات روش جوشکاری (WPS) با استفاده از تست، تائید شوند. علاوه بر این، جوشکارانی که از روش GMAW با انتقال اتصال کوتاه استفاده می‌کنند باید به طور خاص تائید صلاحیت شوند. انتقال اتصال کوتاه GMAW یک حالت انرژی کاهش یافته از انتقال فلز است، به این معنی که این روند به صورت ایده آل برای کاربردهای ورق فولادی مناسب هستند، اما در صورت استفاده در فولاد سنگین‌تر در معرض ابتلا به نقص‌های اتصال از نوع ذوبی قرار می‌گیرند؛ بنابراین، D۱,۱ روند را محدود می‌کند، اما D۱,۳ به طور خاص آن را پذیرفته است (به D۱,۳، پاراگراف ۱ – ۳ – ۱ مراجعه کنید).

جوشکاری با گاز محافظ و الکترود تنگستنی (GTAW) نیز به طور ایده آل برای استفاده در ورق‌های فولادی مناسب است، البته این روش جوشکاری، آهسته‌تر و پر هزینه‌تر می‌باشد. جوشکاری زیر پودری (SAW) با سرعت بالا و به صورت خودکار نیز می‌تواند برای جوشکاری در ورق فولادی با ابعاد کوچک استفاده شود و در زمان مناسب می‌تواند جوش با کیفیت و با سرعت بسیار بالا ایجاد کند. نقاط مقاوم و درز جوش به طور معمول برای ساخت قطعات ورق فولادی در شرایط کارگاهی استفاده می‌شوند.

قبل از خروج از مبحث فرایندهای جوشکاری، توضیحی در خصوص تجهیزات در دستور کار قرار دارد. امروز، انواع منبع تغذیه یا ماشین آلات تغذیه کننده سیم در دسترس هستند که با قدرت ۱۲۰ ولت کار می‌کنند. به طور معمول برای خروجی در حدود

۱۰۰ آمپر، این دستگاه‌ها به طور ایده آل برای جوشکاری در مواد با ابعاد کوچک مناسب هستند. آن‌ها ممکن است مانند «تجهیزات سرگرمی» و نه ماشین آلات مناسب برای کارهای ساخت و ساز به نظر برسند. با این حال، تولید کنندگان خط اصلی تجهیزات جوشکاری، ترکیبات کاربردی را تولید کرده‌اند که با فراهم نمودن فرایندهای جوشکاری که در محدوده ظرفیت ماشین آلات انجام می‌شوند، در شرایط مورد نیاز خود را اثبات کرده‌اند (به شکل ۳ نگاه کنید). در بسیاری از کاربردهای ورق فولادی، پیمانکاران یک ترکیب منبع نیرویی تغذیه کننده سیم در محدوده ظرفیت ۲۰۰ آمپر را انتخاب می‌کنند. امروز، تجهیزات بسیار انعطاف پذیر باعث شده‌اند که طیف گسترده‌ای از فرایندهای SMAW، GTAW، FCAW و GMAW از یک منبع تغذیه تک قابل انجام باشند که به کاربر اجازه انتخاب یک روند بهینه بدون نیاز به خرید تجهیزات اضافی را می‌دهد.

ذوب فلز پایه

مهم‌ترین چالش در جوش ورق فولادی، تمایل به ذوب فلز پایه است. استفاده از فرآیند، روش و تکنیک مناسب جوشکاری یک ابزار برای رسیدگی به این موضوع است. با این حال، چندین ابزار دیگر برای محدود کردن این تمایل موجود هستند. هنگامی که قرار است جوش قوس الکتریکی انجام شود، انتخاب ضخامت مناسب مصالح بسیار مهم است. در حالی که قطعات نازک‌تر جوش داده می‌شوند، یک قانون کلی، حداقل استفاده از ورق فولادی شماره ۱۸ (۰,۰۴۷۸ اینچ / ۱,۲۱۴ میلی متر) است. اگر چه تفاوت ممکن است بزرگ به نظر نرسد، اما جوش دادن ورق شماره ۱۶ به طور قابل توجهی راحت‌تر از ورق شماره ۱۸ است.

ایجاد جوش‌های با کیفیت بر روی اتصالات لب به لب ورق‌های فلزی دشوار است. تغییرات در تناسب، به طور خاص جلوگیری از ذوب فلز پایه را در کار با ورق‌های نازک دشوار می‌سازد. با این حال، در بسیاری از اتصالات، اتصالات لب به لب می‌توانند با اتصالات روی هم (شکل ۴) جایگزین شوند. این کار ضخامت فلز در اتصال را دو برابر می‌کند و ممکن است استفاده از جوش کام را آسان‌تر کند. در شرایط دیگر، جوش‌های شیاری لبه مربعی طولی در قطعه‌های لب به لب می‌توانند با جوش‌های شیاری مورب جایگزین شوند. لبه شکل داده شده زیر اتصال، آن را تقویت نموده و به جفت و جور شدن قسمت‌ها کمک می‌کند و به عنوان یک سینک حرارتی تمایل مذاب به ذوب فلز پایه را محدود می‌کند.

شکل ۵: برش قوسی پلاسما که برش‌های سریع و با کیفیتی را روی ورق‌های فولادی ایجاد می‌کند، مقوله‌ای که دست یافتن به آن با استفاده از برش سوخت اکسی تقریباً غیرممکن است. به علاوه، برش پلاسما می‌تواند تقریباً برای برش هر ماده رسانای الکتریکی از جمله فولاد ضد زنگ و آلومینیوم مورد استفاده قرار گیرد.

چالش‌های جوش کاری

برای جوشکاری مقاطع سنگین، ترک خوردگی یک موضوع مهم است که نیاز به کنترل فلزات پایه، مواد جوش، پیش گرمایش و عوامل دیگر دارد. در کار با ورق فولادی، ترک خوردگی به ندرت مشکل ساز است. با این حال، در استفاده از ورق فولادی با ابعاد کوچک، علاوه بر تمایل مذاب به ذوب فلز پایه، مشکل بالقوه اعوجاج است. کمانش، پیچ و تاب و پیچش، چالش‌های مداوم هستند. با این حال، راه حل نسبتاً ساده است: کوچک نگه داشتن اندازه جوش و ایجاد جوش با بیشترین سرعت ممکن (که این کار با پایین‌ترین سطح حرارت ورودی صورت می‌گیرد). روش جوش کاری GMAW با حرارت ورودی کم در حالت انتقال اتصال کوتاه دارای مزیت دیگری است: اعوجاج کمتری را در مقایسه با تکنیک‌های SMAW معمولی تجربه می‌کند.

بسیاری از ورق‌های فولادی با کاربرد همگانی نیز روکش دار شده‌اند. فولاد گالوانیزه ممکن است برای تأمین مقاومت در برابر خوردگی مورد استفاده قرار گیرد، اما چنین روکشی برخی از چالش‌های جوش کاری را سبب می‌شود. جوشکار باید از دود تولید شده از جوشکاری بر روی فولاد گالوانیزه محافظت شود و الکترودها و یا تکنیک‌های خاصی ممکن است برای جوش دادن موفقیت آمیز چنین موادی نیاز باشند. ورق‌های فولادی نیز ممکن است پوشش خاصی را دریافت کنند که می‌تواند چالش‌های جوشکاری مشابهی ایجاد کند.

برش ورق فولادی

ورق‌های فولادی را می‌توان به روش‌های گوناگونی از جمله قیچی، فلز بر و وسایل مکانیکی دیگر پردازش کرد. برش اکسی سوخت (Oxyfuel) که معمولاً برای سازه‌های فولادی سنگین استفاده می‌شود، به سرعت یک ورق فولادی را از بین خواهد برد. با این حال، برش پلاسما به طور ایده آل برای چنین کاربردهایی (شکل ۵) مناسب است. روند سریع است و تقریباً اجازه برش به هر شکلی را ممکن می‌سازد. ظرفیت ضخامت برش پلاسما بستگی به شدت جریان برق دارد: یک قاعده سخت‌گیرانه تجربی این است که برای برش هر یک صدم اینچ از ضخامت فولاد یک آمپر انرژی مورد نیاز است؛ بنابراین، یک ماشین ۲۵ آمپر می‌تواند فولاد با ضخامت حدود $\frac{۲۵}{۱۰۰}$ و $\frac{۱}{۴}$ اینچی را یا برش دهد. امروز، ماشین آلاتی در دسترس هستند که به راحتی به ولتاژ ۱۲۰ ولت متصل شده و در هوای فشرده کار می‌کنند.

خلاصه

استفاده از ورق فولادی در برنامه‌های ساخت و ساز در حال حاضر ایجاد شده است و به احتمال زیاد رشد خواهد کرد. جوش کاری خود را به عنوان یک ابزار ضروری برای ساخت و ساز و احداث سازه‌های ساخته شده از اشکال سازه‌ای نورد گرم ثابت کرده است و نقش اساسی آن در کاربردهای ورق فولادی نیز حائز اهمیت است. با این حال، روند جوش کاری در دو حالت، در آیین نامه‌های اجرایی، فرآیندها، انواع جوش و چالش‌ها متفاوت است. ساخت و ساز موفقیت آمیز مصالح با ابعاد کوچک صرفاً برخی از تنظیمات جزئی در تکنیک‌های تفکر و ساخت را می‌طلبد.

مترجم: پوریا نخعی