

بررسی آزمایشگاهی جوش اکسی استیلن و قوس الکتریکی با الکترودهای: فولادی، برنجی و برنزی

بهمن شروانی تبار* (استادیار)

سعید انتقامی مایان (کارشناس ارشد)

ارژنگ صادقی (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱ (دوره ۲ - ۳۸، شماره ۲/۲، ص. ۱۱۱-۱۱۹، پژوهشی)

با پیشرفت صنعت جوشکاری و اهمیت جلوگیری از خوردگی فلز جوش در شرایط محیطی مختلف، بررسی کارایی روش‌های مختلف جوشکاری با انواع فلز پرکننده، امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در پژوهش حاضر، به صورت آزمایشگاهی مقاومت و کیفیت جوشکاری با استفاده از سه الکتروده: برنجی، برنزی و فولادی با دو فرایند جوشکاری قوس الکتریکی و اکسی استیلن بررسی شده است. در این راستا، ابتدا به کمک آزمون کشش، مشخصات مصالح فلز پایه تعیین و پس از آن، با تهیه، ساخت و جوشکاری ۴۶ نمونه‌ی آزمایشگاهی، رفتار انواع جوش در سه حالت بارگذاری: کششی، برشی و خمشی بررسی شده است. بررسی نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با تقریب قابل قبولی می‌توان مقاومت جوش در قوس الکتریکی با الکتروده فولادی را در تمام ضخامت‌ها، یکسان لحاظ کرد؛ همچنین می‌توان از تأثیر ضخامت در مقاومت کششی جوش صرف‌نظر کرد. این در حالی است که ضخامت قطعه، تأثیر قابل توجهی در کیفیت جوشکاری اکسی استیلن دارد. نتایج آزمایش‌ها نیز نشان داد که جوشکاری با قوس الکتریکی با الکترودهای فولادی در انواع نمونه‌ها، مقاومت‌های بهتری نسبت به سه نوع جوش دیگر دارد و بعد از آن، مقاومت جوشکاری با قوس الکتریکی با الکتروده فسفر برنز در رتبه دوم است.

واژگان کلیدی: جوش اکسی استیلن، جوش قوس الکتریکی، الکتروده برنزی، الکتروده برنجی، الکتروده فولادی.

۱. مقدمه

در منطقه‌ی تفتیده و تحت تأثیر حرارت HAZ^۱، ساختار اولیه‌ی فولاد تغییر پیدا می‌کند و متناسب با جنس فلز جوش و میزان واکنش پذیری آن با فلز پایه و سرعت سرد شدن آن، شکل پذیری و قابلیت ترک خوردگی جوش تحت تأثیر قرار می‌گیرد. میزان تغییرات خواص مکانیکی جوش و کیفیت واکنش جوش با فلز پایه به پارامترهای متعددی از شرایط جوشکاری، مانند: روش جوشکاری، دمای محیط، مدت زمان جوشکاری، سرعت سرد شدن و ضخامت قطعه و نوع درز جوش بستگی دارد. تعدد پارامترهای دخیل در بحث مقاومت جوش منجر شده است که یکی از متداول‌ترین مد خرابی در انواع مختلف سازه‌ها، خرابی جوش در ناحیه‌ی تفتیده‌ی اتصال باشد، که بیان‌گر اهمیت بررسی خواص جوش تحت بارگذاری‌های مختلف خواهد بود. در راستای بررسی خواص جوش، کارایی، سازگاری و مقاومت فرایندهای جوشکاری در انواع مصالح متداول بررسی شده است. با توجه به قابلیت زنگ زدن جوش در سازه‌های در معرض رطوبت،^۱ بررسی کارایی فرایندهای جوشکاری (جوشکاری

قوس الکتریکی، جوش‌کاری زیر پودری، جوشکاری با گاز محافظ و جوشکاری اکسی استیلن) با سیم جوش برنجی و برنزی، امری اجتناب‌ناپذیر است.^۲ فلز برنج، آلیاژ مس است که از مس و روی و گاهی اوقات از قلع و مقداری سرب تشکیل می‌شود. برنج را می‌توان با الکترودهای گرافیتی و الکتروده معمولی جوشکاری کرد. در جوشکاری با الکتروده گرافیتی از آلیاژ برنز یا از آلیاژی مشابه آلیاژ فلزی، که باید جوش داده شود، استفاده می‌شود. در جوشکاری برنج از جریان معکوس استفاده می‌شود و فاصله‌ی الکتروده تا قطعه‌ی کار باید حدود ۵ تا ۶ میلی‌متر باشد. هاگنس^۲ و همکاران (۲۰۰۲)،^۳ جوشکاری فلز برنج با جریان برق را بررسی کردند و دریافته‌اند که برنج در مقابل زنگ زدن و پوسیدن مقاوم است؛ ولی چون فلز روی در دمایی نزدیک دمای ذوب برنج، تبخیر می‌شود، بخار شدن فلز روی و تولید گاز سمی در محیط کار به همراه تیره شدن محل جوشکاری به دلیل اکسید حاصل، جوشکاری فلز برنج با الکتروده فلزی با مشکل روبرو می‌شود.

زانگ^۳ و همکاران (۲۰۰۷)،^۴ در بررسی رفتار اتصال جوشی آلومینیوم به فولاد گالوانیزه دریافته‌اند که با تغییر مقدار حرارت حوضچه‌ی مذاب، مقاومت جوش و ترکیب شیمیایی ناحیه‌ی جوش متفاوت خواهد شد.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۸، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۲/۲۱، پذیرش ۱۴۰۱/۲/۵.

DOI:10.24200/J30.2022.59572.3061

b.shervani@azaruniv.ac.ir
Shahab.ss349@yahoo.com
a.sadeghi@azaruniv.ac.ir

لین ۴ و همکاران (۲۰۱۰) [۶] نیز در بررسی تطابق روش جوشکاری قوسی با الکتروکود تنگستن نتیجه گرفتند که در فرایند اخیر، مصالح فولادی بدون ذوب باقی می‌مانند و ذوب شدن مصالح آلومینیومی منجر به ایجاد پوششی بر روی فولاد می‌شود.

همچنین اورت ۵ و همکاران (۲۰۱۵) [۷] در بررسی جوشکاری فلز مس، دریافتند که بهترین روش جوشکاری مس با جوش گاز اکسیژن و کاربید است، ولی می‌توان جوشکاری را با قوس الکترونیکی نیز انجام داد. در روش اخیر، ورق‌های مس را مانند ورق‌های فولادی برای جوشکاری آماده می‌کنند، ولی چون قابلیت هدایت حرارت مس زیاد است، باید مقدار آمپر را اندکی بیشتر در نظر گرفت و بهتر است که همیشه با جریان مستقیم جوشکاری را انجام داد. زاویه الکتروکود نسبت به قطعه‌ی کار، مانند جوشکاری فولاد است و طول قوس باید حدود ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر باشد.

در همان سال، لیاثو^۶ و همکاران (۲۰۱۵) [۸] نیز پس از بررسی جوشکاری آلیاژهای فولاد بیان کردند که برای مصارف در صنعت، فولاد را با مواردی، از قبیل: منگنز، نیکل، تنگستن و کرم ترکیب می‌کنند و می‌توان آنها را با قوس الکترونیکی به هم جوش داد؛ ولی جوشکاری آنها به مراتب سخت‌تر از آهن است. زیرا در بعضی موارد، آلیاژ اصلی فولاد در نتیجه‌ی حرارت زیاد تجزیه و یا باعث سخت شدن قسمت گرم شده می‌شود. این امر منجر به ایجاد ترک در سطح جوشکاری خواهد شد. ضمناً گال جوش و گاز حاصل از سوختن پوسته‌ی الکتروکود در گذشته‌ی جوشکاری باقی می‌ماند و باعث کاهش استحکام جوشکاری می‌شود.

پدود و موموجیمو^۷ (۲۰۱۵)، اثر حرارت ورودی در خواص مکانیکی فولاد کم کربن را با استفاده از دو نوع جوشکاری اکسی‌استیلن و قوس الکترونیکی با الکتروکود پوشش‌دار بررسی کردند و دریافتند که با افزایش گرمای ورودی، استحکام کششی و سختی کاهش می‌یابد، ولی استحکام جوش در مقابل آزمایش ضربه افزایش می‌یابد. [۹]

سویتز^۸ و همکاران (۲۰۱۸) [۱۰] طی آزمایش‌هایی در بررسی تأثیر نوع فلز پرکننده در اتصال بین سیلیکون برنز و فولاد ضدزنگ با جوشکاری قوس الکترونیکی با الکتروکود تنگستن (TIG) دریافتند که استحکام و شکل‌پذیری اتصال مذکور هنگام استفاده از سیلیکون برنز به عنوان فلز پرکننده، نسبت به حالتی که از فولاد ضدزنگ برای فلز پرکننده استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد.

سیوی‌جان^۹ و همکاران (۲۰۲۰) [۱۱] بر اساس نتایج یک برنامه‌ی آزمایشگاهی که انجام داده بودند، پیشنهاد کردند که در صورت لزوم، جوش اکسی‌استیلن را می‌توان به عنوان یک جایگزین برای جوشکاری با قوس الکترونیکی در نظر گرفت. این پیشنهاد در رابطه با تعمیرات اضطراری، جوشکاری در مناطق دورافتاده و مناطقی با عدم دسترسی به منابع الکترونیکی است.

چنگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۰) [۱۲] اتصال مس به فولاد ضدزنگ را با دو روش جوشکاری قوس الکترونیکی با الکتروکود تنگستن (TIG) [۱۱] و جوشکاری قوس الکترونیکی با گاز محافظ خنثی (MIG) [۱۲] و با استفاده از سه نوع فلز پرکننده (فلز بر پایه‌ی مس، فلز بر پایه‌ی مس - نیکل و فلز بر پایه‌ی آهن) بررسی کردند و دریافتند که بیشینه‌ی استحکام کششی با استفاده از فلز پرکننده بر پایه‌ی مس به دست می‌آید و همچنین اتصال اخیراً، بیشترین تغییر شکل خمیری را نیز از خود نشان می‌دهد.

سینک^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۱) [۱۳] در نوشتاری با مرور نوشتارهای پیشین به کاربردهای جوش اکسی‌استیلن، مانند برش فلزات و آلیاژها در بسیاری از صنایع پرداختند، که با استفاده از مشعل اکسی‌استیلن به راحتی انجام‌پذیر است. از نتایج بیان شده در پژوهش مذکور آن است که خواص مکانیکی جوش به نوع شعله‌ی مورد استفاده برای جوشکاری بستگی دارد و برای جوشکاری عناصر فولادی نباید

از شعله‌ی اکسیدکننده استفاده شود؛ زیرا فلز ذوب شده در محل جوش، از نوع متخلخل، اکسید شده و شکننده خواهد بود. همچنین ایشان تأکید کرده‌اند که هر چند جوشکاری اکسی‌استیلن در صنایع کوچک، کاربرد فراوانی دارد، اما مطالعات کمی در مورد آن انجام شده است.

کورزک^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۱) [۱۴] اتصال عناصر فلزی را با سه روش: جوشکاری قوس الکترونیکی با الکتروکود تنگستن (TIG)، جوشکاری قوس الکترونیکی با گاز محافظ فعال (MAG) [۱۵] و جوشکاری قوس الکترونیکی با الکتروکود پوشش‌دار بررسی کردند و آزمایش‌هایی برای تعیین خواص مکانیکی به ویژه سختی و استحکام اتصال‌ها در برابر بار و دمای بهره‌برداری انجام دادند و دریافتند که سه روش اخیر از نظر استحکام، اختلاف جزئی با یکدیگر دارند و تقریباً یکسان عمل می‌کنند.

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی مقاومت، کارایی و تطابق روش‌های مختلف جوشکاری با انواع فلز پرکننده، چهار نوع جوشکاری (ترکیبی از سه نوع الکتروکود و دو نوع فرایند جوشکاری) بررسی شده است. فرایندها و الکتروکودهای بررسی شده، شامل: جوشکاری اکسی‌استیلن با الکتروکود برنجی، جوشکاری قوس الکترونیکی با الکتروکود فولادی و جوشکاری با الکتروکود برنزی (فسفر برنز) با دو فرایند قوس الکترونیکی و اکسی‌استیلن هستند. در این راستا، ابتدا با انجام آزمایش کشش استاندارد، مشخصات مصالح فلز پایه تعیین شده است. پس از آن، با تهیه، ساخت و جوشکاری ۴۶ نمونه‌ی آزمایشگاهی، رفتار انواع جوش در سه حالت: بارگذاری کشش، برش و خمش بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. معرفی مدل‌های آزمایشگاهی

نحوه‌ی نام‌گذاری نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۱، مشخصات الکتروکودهای مصرفی در جدول ۲ و مواد تشکیل‌دهنده‌ی آنها در جدول ۳ ارائه شده‌اند. به منظور بررسی مشخصات مکانیکی فلز پایه، سه آزمایش کشش فولاد مطابق استاندارد ASTM EA/EAM [۱۵] انجام شده است، که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق نتایج به دست آمده، میانگین تنش تسلیم و تنش نهایی فلز پایه به ترتیب برابر ۲۷۹۰ و ۴۰۷۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است.

مطابق اهداف پژوهش، رفتار جوش در سه حالت بارگذاری کششی، برشی و خمشی و مطابق جزئیات آیین‌نامه‌ی جوشکاری ساختمانی ایران [۱۶] بررسی شده است. مطابق شکل ۱، در بررسی مقاومت جوش تحت کشش، قطعات فولادی به صورت مستطیلی به ابعاد ۵° × ۲۵° میلی‌متر و در ۳ ضخامت (t) مختلف: ۳، ۵ و ۸ میلی‌متر لحاظ شده‌اند. در این حالت، ۲۴ نمونه برای آزمون کشش آماده شدند، که شامل: ۳ ضخامت ورق و ۴ روش جوشکاری متفاوت بوده و از هر نمونه، ۲ مورد تهیه شده است. مطابق شکل ۲، در تعیین مقاومت جوش تحت برش، قطعات فولادی به صورت مستطیلی به ابعاد ۴۰ × ۲۰ میلی‌متر و در ۲ ضخامت

جدول ۱. نام‌گذاری نمونه‌های آزمایشگاهی.

نام نمونه‌ها	فرایند جوشکاری و نوع الکتروکود
A۱ و A۲	اکسی‌استیلن با فسفر برنز
B۱ و B۲	قوس الکترونیکی با فسفر برنز
C۱ و C۲	قوس الکترونیکی با الکتروکود فولادی
D۱ و D۲	اکسی‌استیلن با برنج

جدول ۲. مواد تشکیل دهنده الکترودهای مصرفی بر حسب درصد.

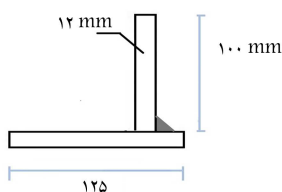
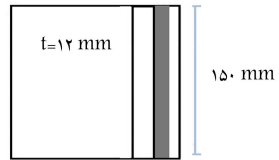
Sn	P	Si	Mn	C	Zn	Cu	Fe	جنس سیم جوش
-	۰/۰۲	۰/۴۰	۰/۵۰	۰/۰۸	-	-	۹۹	فولادی
۴/۶	۰/۴	-	-	-	-	۹۵	-	فسفر برنز
۰/۲	-	۰/۳	-	-	۳۹/۵	۶۰	-	برنجی

جدول ۳. مشخصات الکترودهای مصرفی.

جنس سیم جوش	تنش کششی نهایی (N/mm ²)	تنش تسلیم (N/mm ²)	ازدیاد طول (%)
فولادی	۵۵۰-۴۵۰	۳۶۰	۲۲
فسفر برنز	۴۵۰-۴۰۰	۳۰۰	۲۶
برنجی	۳۵۰-۳۰۰	۲۱۵	۲۱

جدول ۴. نتایج آزمایش آزمون کشش بر روی فلز پایه.

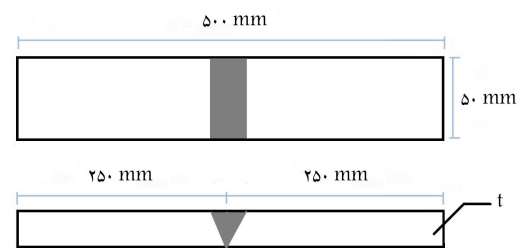
نمونه	مدول کشسانی (GPa)	تنش تسلیم (kg/cm ²)	تنش نهایی (kg/cm ²)
۱	۱۹۶	۲۷۵۵	۴۰۵۱
۲	۱۹۱	۲۸۰۳	۴۰۷۷
۳	۲۰۶	۲۸۱۲	۴۰۸۱



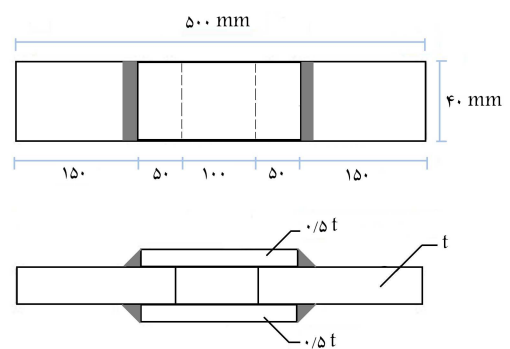
شکل ۳. ابعاد نمونه‌های آزمون جوش تحت خمش.



شکل ۴. آماده‌سازی نمونه‌های کششی برای جوشکاری.



شکل ۱. ابعاد نمونه‌های آزمون جوش تحت کشش.



شکل ۲. ابعاد نمونه‌های آزمون جوش تحت برش.

۲.۲. آماده‌سازی و جوشکاری نمونه‌های آزمایشگاهی

مطابق جزئیات آیین‌نامه‌ی جوشکاری ساختمانی ایران، نشریه‌ی ۲۲۸ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور^[۱۶] و استاندارد AWS D۱/۱^[۱۷]، قطعات از ورق پایه در کارگاه برش‌کاری توسط دستگاه گیوتین و مطابق ابعاد مذکور در شکل‌های ۱ تا ۳ برش داده شدند. به دلیل وجود پلیسه‌ها و لبه‌های تیز و برنده، قطعات بعد از برش، پلیسه‌گیری و سپس آماده‌ی جوشکاری شدند. در ادامه، جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی در هر ۳ حالت بارگذاری کششی، برشی و خمشی تشریح شده است.

۱.۲.۲. نمونه‌های آزمون کشش جوش

به منظور بررسی رفتار جوش تحت کشش، ۲۴ نمونه در کارگاه ساخته شدند و برای ایجاد جوش با نفوذ کامل در نمونه‌های آزمون کشش جوش مطابق شکل ۴، لبه‌ی ورق‌های با ضخامت بزرگ‌تر و مساوی ۵ میلی‌متر به شکل V برش داده شده است. در شکل‌های ۵ الی ۷، نمونه‌هایی از مدل‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

۲.۲.۲. نمونه‌های آزمون برش جوش

برای بررسی رفتار جوش تحت برش، ۱۴ نمونه در کارگاه ساخته شدند. همان‌طور که

مختلف t برابر ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر لحاظ شده‌اند. در این حالت، ۱۴ نمونه در کارگاه ساخته شد. ضخامت ورق‌های اصلی برابر t (در ۲ ضخامت مختلف ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر) و ضخامت ورق‌های اتصال‌دهنده برابر $\frac{t}{2}$ است. نهایتاً، مطابق شکل ۳، در تعیین مقاومت جوش تحت خمش، قطعات فولادی به کمک دو ورق به ابعاد $۱۲ \times ۱۲۵ \times ۱۵$ میلی‌متر و $۱۲ \times ۱۰۰ \times ۱۵$ میلی‌متر ساخته شدند و تحت بارگذاری قرار گرفتند. در این حالت نیز ۸ نمونه در کارگاه ساخته شده است.



شکل ۸. ورق‌های اصلی با ضخامت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر برای آزمون برش جوش.



شکل ۵. نمونه‌ی کششی جوشکاری شده به روش اکسی استیلن با الکتروود فسفر برنز.



شکل ۹. آماده‌سازی نمونه‌های برشی برای جوشکاری.



شکل ۶. نمونه‌ی کششی جوشکاری شده به روش اکسی استیلن با الکتروود برنج.



شکل ۱۰. جوش‌کاری نمونه‌های آزمون برش در حالت تخت.



شکل ۷. نمونه‌ی کششی جوشکاری شده به روش قوس الکتریکی با الکتروود فولادی.



شکل ۱۱. نمونه‌های آماده شده‌ی آزمون برش با ورق اصلی ۲۰ میلی‌متر.

قبلاً ذکر شد، ورق‌های اصلی به صورت مستطیلی به ابعاد 40×200 میلی‌متر و در ۲ ضخامت مختلف t برابر ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر آماده شدند. در این حالت، ضخامت ورق‌های اتصال‌دهنده به ترتیب برابر ۵ و ۱۰ میلی‌متر بوده است، که جزئیات آن در شکل‌های ۸ الی ۱۲ مشاهده می‌شوند.

۳.۲.۲. نمونه‌های آزمون خمشی جوش

۸ نمونه‌ی خمشی برای بررسی کیفیت جوش تحت درکارگاه ساخته شدند، که جزئیات کلی ساخت آنها در شکل‌های ۱۳ الی ۱۶ مشاهده می‌شوند.

۳.۲. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها و بارگذاری مدل‌ها

در پژوهش حاضر، نمونه‌ها توسط دستگاه کشش یونیورسال با سرعت $2/0$ میلی‌متر در هر دقیقه تا لحظه‌ی گسیختگی تحت بار قرار گرفتند. در دستگاه کشش یونیورسال، علاوه بر آزمون‌های کشش و فشار، آزمون‌های دیگری نیز مانند خمش، برش، قدرت اتصال و استحکام شکست انجام‌پذیر هستند. مطابق شکل‌های ۱۷ الی ۱۹، برای رسیدن به شرایط بارگذاری مورد نظر، باید فک‌های دستگاه و جهت قرارگیری نمونه‌ها متناسب با ۳ نوع بارگذاری: کششی، برشی و خمشی تنظیم شود.

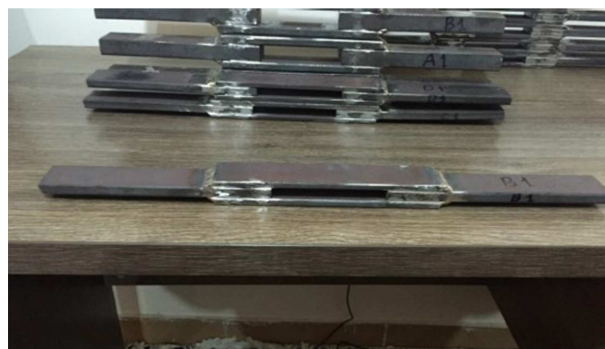
۳. بررسی نتایج آزمایشگاهی

۳.۱. بررسی نتایج نمونه‌های آزمون جوش تحت کشش

در بخش حاضر، نتایج ارزیابی مقاومت جوش تحت نیروی کششی بررسی شده است. تحت نیروی محوری کششی، مد خرابی غالب بر رفتار تمامی نمونه‌ها، مطابق



شکل ۱۶. نمونه‌ی آماده شده برای آزمون خمش.



شکل ۱۲. نمونه‌های آماده شده‌ی آزمون برش جوش با ورق اصلی ۱۰ میلی‌متر.



شکل ۱۷. دستگاه یونیورسال در حال آزمون یکی از نمونه‌های کششی.



شکل ۱۳. ورق‌های با ضخامت ۱۲ میلی‌متر برای نمونه‌ی خمشی قبل از جوشکاری.



شکل ۱۴. آماده‌سازی نمونه‌های آزمون خمش برای جوشکاری با زدن پشت‌بند برای حفظ زاویه‌ی ۹۰ درجه بین قطعات فولادی.



شکل ۱۸. دستگاه یونیورسال در حال آزمون یکی از نمونه‌های برشی.



شکل ۱۵. جوشکاری نمونه‌های آزمون خمش در حالت تخت.

جدول ۵. مقاومت کششی نمونه‌های آزمون کشش با ورق به ضخامت ۳ میلی‌متر.

نمونه	فرایند جوشکاری و نوع الکتروود	مقاومت کششی (kg/cm ²)
A1	اکسی‌استیلن با الکتروود فسفر برنز	۱۵۱۱/۶۶
A2	اکسی‌استیلن با الکتروود فسفر برنز	۱۴۷۱/۶۶
B1	قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز	۲۸۵۱/۶۹
B2	قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز	۲۴۵۷/۸۷
C1	قوس الکتریکی با الکتروود فولادی	۳۶۰۶/۶۶
C2	قوس الکتریکی با الکتروود فولادی	۳۵۹۳/۳۳
D1	اکسی‌استیلن با الکتروود برنج	۲۲۵۴/۶۴
D2	اکسی‌استیلن با الکتروود برنج	۲۰۴۱/۳۶

جدول ۶. مقاومت کششی نمونه‌های آزمون کشش با ورق به ضخامت ۵ میلی‌متر.

نمونه	فرایند جوشکاری و نوع الکتروود	مقاومت کششی (kg/cm ²)
A1	اکسی‌استیلن با الکتروود فسفر برنز	۹۵۴
A2	اکسی‌استیلن با الکتروود فسفر برنز	۱۱۷۲
B1	قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز	۲۷۸۵/۲۹
B2	قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز	۲۸۲۵/۳۸
C1	قوس الکتریکی با الکتروود فولادی	۳۴۰۲
C2	قوس الکتریکی با الکتروود فولادی	۳۵۳۳
D1	اکسی‌استیلن با الکتروود برنج	۲۶۱۸
D2	اکسی‌استیلن با الکتروود برنج	۲۴۶۰

جدول ۷. مقاومت کششی نمونه‌های آزمون کشش با ورق به ضخامت ۸ میلی‌متر.

نمونه	فرایند جوشکاری و نوع الکتروود	مقاومت کششی (kg/cm ²)
A1	اکسی‌استیلن با الکتروود فسفر برنز	۱۲۰۶/۱۵
A2	اکسی‌استیلن با الکتروود فسفر برنز	۱۱۰۵/۳۰
B1	قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز	۲۱۰۲/۶۳
B2	قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز	۲۳۱۰/۷۴
C1	قوس الکتریکی با الکتروود فولادی	۴۰۵۸/۹۴
C2	قوس الکتریکی با الکتروود فولادی	۴۰۸۲/۱۷
D1	اکسی‌استیلن با الکتروود برنج	۱۵۲۳/۴۱
D2	اکسی‌استیلن با الکتروود برنج	۱۹۸۳/۹۶

اکسی‌استیلن با الکتروود برنجی، نمونه‌های با ضخامت ۸ میلی‌متر نسبت به نمونه‌های با ضخامت ۵ میلی‌متر، مقاومت کششی کمتری را نشان داده‌اند (جدول‌های ۶ و ۷). از مشاهدات عینی می‌توان گفت که در ضخامت‌های بیشتر، نیاز به پیش‌گرمایش زیاد و افزایش قدرت مشعل وجود دارد و الکتروود برنجی در حالت مذاب، بسیار سیال است و از محیط حوضچه خارج می‌شود. در این حالت تنظیم مذاب در خط جوش بسیار مشکل است، به طوری که در نمونه‌های برشی ۲۰ میلی‌متری، امکان جوشکاری و ساخت نمونه از بین رفته بود. در قطعات مذکور، به دلیل افزایش ضخامت قطعات و تسریع در انتقال حرارت، نیاز به افزایش بیش از حد پیش‌گرمایش و درجه مشعل بود و برنج مذاب، کاملاً روان بوده و از محیط خارج شده است. لذا در جدول ۸ ملاحظه می‌شود که جای مقاومت برشی نمونه‌های مذکور، خالی بوده و ساخت آنها ممکن نشده است.

در مورد جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز، مقاومت کششی در ضخامت ۸ میلی‌متر نسبت به ضخامت ۵ میلی‌متر، به طور متوسط حدود ۲۱٪



شکل ۱۹. دستگاه یونیورسال در حال آزمون یکی از نمونه‌های خمشی.



شکل ۲۰. تعدادی از نمونه‌های کششی بعد از انجام آزمایش (با انواع مختلف جوش).

شکل ۲۰ است. نتایج آزمایش کشش بر روی ورق‌ها با سه ضخامت مختلف در جدول‌های ۵ الی ۷ ارائه شده‌اند. نمونه‌های C (که با الکتروود فولادی و به روش قوس الکتریکی جوشکاری شده‌اند)، مقاومت کششی بیشتری نسبت به بقیه نمونه‌ها از خود نشان داده‌اند. و بعد از آن، جوش با قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز، مقاومت کششی بهتری نشان داده‌اند.

در جوشکاری اکسی‌استیلن مشاهده شد که استفاده از الکتروود برنجی، نتایج بهتری نسبت به استفاده از الکتروود فسفر برنز دارد. از طرفی، با تقریب قابل قبولی می‌توان مقاومت جوش در قوس الکتریکی با الکتروود فولادی را در تمام ضخامت‌ها یکسان لحاظ و از تأثیر ضخامت در مقاومت جوش صرف‌نظر کرد. ولی ضخامت قطعه، تأثیر قابل توجهی در کیفیت جوشکاری اکسی‌استیلن دارد.

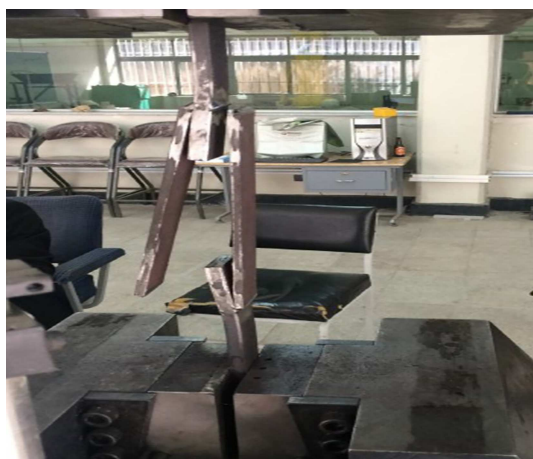
تأثیر نوع فرایند جوشکاری در مقاومت کششی اتصال‌ها، بسیار بیشتر از تأثیر ضخامت نمونه‌ها بوده است. با اطمینان می‌توان گفت که از لحاظ مقاومت کششی، جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود فولادی نسبت به بقیه فرایندها، در رتبه اول قرار دارد. جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز در رتبه دوم، جوشکاری اکسی‌استیلن با الکتروود برنج در رتبه سوم و جوشکاری اکسی‌استیلن با الکتروود فسفر برنز در رتبه چهارم قرار دارد. در هر کدام از فرایندها، در ضخامت‌های ۳، ۵ و ۸ میلی‌متر، تفاوت‌هایی در مقاومت کششی (تنش نهایی گسیختگی) ملاحظه می‌شود. در بیشتر نمونه‌ها، اختلاف کم بوده یا با افزایش ضخامت، مقاومت افزایش یافته است. در دو مورد، کاهش قابل ملاحظه‌ای وجود دارد، که با توجه به بازرسی چشمی نمونه‌های آزمایش شده، توضیحات به این شرح داده می‌شود: در مورد جوش



شکل ۲۱. تشکیل ترک و رشد آن در روی خط جوش در نمونه‌ی برشی.



شکل ۲۲. نمونه‌ی برشی با جوش اکسی‌استیلن و الکتروود برنجی (بعد از انجام آزمون).



شکل ۲۳. یکی از نمونه‌های برشی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر بعد از انجام آزمون.

گسترش ترک از عمق به سطح آن مطابق شکل ۲۱ گسیختگی نهایی رخ داده است.

۳.۳. بررسی نتایج نمونه‌های آزمون جوش تحت خمش

در شروع آزمایش خمشی، یکی از نمونه‌های خمشی تحت فشار له شده و جوش شکسته است و کیفیت آن بعد از مشاهده‌ی قسمت شکسته شده‌ی خط جوش با ذره‌بین بررسی شده است (شکل ۲۴).

برای له کردن نمونه‌های خمشی از فک‌های مخصوص استفاده شده است. بیشترین نیرو برای له کردن نمونه‌های خمشی با جوش قوس الکتریکی با الکتروود فولادی حاصل شده است. در این‌جا نیز الکتروود فسفر برنز با فرایند قوس الکتریکی در رتبه‌ی دوم قرار گرفته است.

با بررسی خط جوش‌های شکسته شده مشاهده شد که جوش قوس الکتریکی با الکتروودهای فولادی و فسفر برنز به ترتیب در کیفیت اول و دوم قرار دارند. اما

جدول ۸. مقاومت برشی نمونه‌های آزمون برش با ورق اصلی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر.

نمونه	فرایند جوشکاری و نوع الکتروود	مقاومت کششی (kg/cm ²)
A1	اکسی‌استیلن با الکتروود فسفر برنز	۱۸۵۳/۶۴
A2	اکسی‌استیلن با الکتروود فسفر برنز	۱۶۶۳
B1	قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز	۲۱۵۷/۸۱
B2	قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز	۲۰۹۴/۲۷
C1	قوس الکتریکی با الکتروود فولادی	۵۵۵۱/۵۶
C2	قوس الکتریکی با الکتروود فولادی	۶۰۰۸/۸۵
D1	اکسی‌استیلن با الکتروود برنج	---
D2	اکسی‌استیلن با الکتروود برنج	---

جدول ۹. مقاومت برشی نمونه‌های آزمون برش با ورق اصلی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر.

نمونه	فرایند جوشکاری و نوع الکتروود	مقاومت کششی (kg/cm ²)
A1	اکسی‌استیلن با الکتروود فسفر برنز	۲۱۱۵/۵۲
A2	اکسی‌استیلن با الکتروود فسفر برنز	۲۱۲۰/۷۲
B1	قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز	۲۳۷۷/۵۰
B2	قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز	۲۱۶۸/۷۵
C1	قوس الکتریکی با الکتروود فولادی	۴۳۴۰/۶۲
C2	قوس الکتریکی با الکتروود فولادی	۴۰۹۰/۱۰
D1	اکسی‌استیلن با الکتروود برنج	۱۴۱۷/۹۷
D2	اکسی‌استیلن با الکتروود برنج	۱۶۵۱/۸۷

کاهش یافته است. با بررسی چشمی پس از آزمون نمونه‌ها، ملاحظه شد که در جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود فسفر برنز، حباب‌های بسیار ریزی در داخل فلز جوش به وجود آمده است، که مقدار آنها در نمونه‌های با ضخامت ۸ میلی‌متر خیلی بیشتر از نمونه‌های ۳ و ۵ میلی‌متر بوده است. احتمال داده می‌شود که با توجه به شرایط کارگاه و تجهیزات جوشکاری، تنظیم جریان ترانسفورماتور برای ضخامت ۸ میلی‌متر مناسب نبوده است. احتمالاً در ضخامت‌های بالاتر، شدت جریان بیشتری برای الکتروود فسفر برنز لازم است؛ در حالی که با همان موتور جوش، جوشکاری با الکتروود فولادی به راحتی و با سرعت و دقت بیشتری انجام شده است.

۲.۳. بررسی نتایج نمونه‌های آزمون جوش تحت برش

مطابق نتایج جدول‌های ۸ و ۹، مقاومت برشی جوش در نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود فولادی و فرایند جوشکاری با قوس الکتریکی با افزایش ضخامت افزایش یافته است. از طرفی، نمونه‌های اخیراً، مقاومت برشی بیشتری نسبت به بقیه‌ی نمونه‌ها از خود نشان داده‌اند. بعد از آن نیز به ترتیب نمونه‌های A، B، D و مقاومت برشی کمتری داشته‌اند.

جوشکاری با فرایند اکسی‌استیلن در ضخامت کمتر، بهتر عمل کرده و حتی جوش اکسی‌استیلن با برنج برای ضخامت ۲۰ میلی‌متر امکان‌پذیر نشده است. چون حرارت ایجاد شده توسط ورق‌های ضخیم از محل جوش انتقال پیدا کرده و حرارت کافی برای ایجاد حوضچه‌ی جوش فراهم نشده است. در شکل‌های ۲۱ الی ۲۳، مد خرابی غالب در نمونه‌های برشی مشاهده می‌شود. در تمامی مدل‌ها، لحظه‌ی رسیدن به حد نهایی مقاومت نمونه با ایجاد ترک در ریشه‌ی جوش شروع شده و با

لحاظ کیفیت جوش (با توجه به نمونه‌های خمشی پس از شکستن) ملاحظه شد که جوش با قوس الکتریکی با الکتروود فولادی کیفیت بالاتری دارد، زیرا خط جوش شکسته شده، یکنواخت و بدون حباب بوده است.

۲) جوش فسفر برنز طی آزمایش‌های انجام شده هم از لحاظ جوشکاری با اکسی استیلن و هم جوشکاری با قوس الکتریکی در رتبه‌ی دوم قرار دارد. علت این که در کشتی‌سازی، صنایع دریایی و در پمپ‌ها از جوش برنزی استفاده می‌کنند، این است که در عین حال که مقاومت قابل قبولی دارد، از لحاظ دوام و پایایی و همچنین مقاومت در برابر عوامل شیمیایی و آب دریا نسبت به سایر جوش‌ها برتری دارد.

۳) برای ضخامت‌های بیشتر از ۵ میلی‌متر، جوشکاری با اکسی استیلن اصلاً توصیه نمی‌شود و جوشکاری اخیر فقط برای جوشکاری ورق‌های نازک به کار می‌رود. به دلیل این که به هیچ وجه هم از لحاظ زمانی و هم از نظر اقتصادی، برای جوشکاری قطعات ضخیم مناسب نیست و در ضخامت‌های بالاتر، که در اسکلت‌های فولادی به کار می‌روند، امکان‌پذیر نیست؛ زیرا به علت انتقال سریع حرارت از طریق قطعات اصلی فولادی، امکان جوشکاری صحیح با اکسی استیلن وجود ندارد.

۴) در جوشکاری با اکسی استیلن، حتماً قطعات باید پیش‌گرمایش بیشتری داشته باشند.

۵) در نمونه‌های با ضخامت کوچک‌تر، هر چهار نوع جوشکاری بررسی شده، کیفیت جوش بهتری داشته‌اند.

۶) با تقریب قابل قبولی می‌توان مقاومت جوش در قوس الکتریکی با الکتروود فولادی را در تمام ضخامت‌ها یکسان در نظر گرفت و از تأثیر ضخامت در مقاومت کششی جوش صرف‌نظر کرد.

۷) ضخامت قطعه، تأثیر قابل توجهی در کیفیت جوشکاری اکسی استیلن داشته است.



شکل ۲۴. یکی از نمونه‌های خمشی در هنگام شروع آزمایش.

جوشکاری با فرایند اکسی استیلن و الکتروودهای فسفر برنز و برنج، کیفیت پایینی دارند؛ به طوری که حباب‌های ریز در سطح شکسته‌ی جوش وجود دارند. احتمال دارد که ضخامت ۱۲ میلی‌متری مربوط به نمونه‌های اخیر باعث انتقال سریع حرارت مشعل از ناحیه‌ی جوش و موجب کاهش کیفیت جوش شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مقاومت جوش تحت دو فرایند جوشکاری مختلف (قوس الکتریکی و اکسی استیلن) با سه الکتروود متفاوت (مفتول برنجی، برنزی و فولادی) و ۳ حالت بارگذاری کشش، برش و خمش بررسی شده است. در این راستا، ۲۴ نمونه‌ی کششی، ۱۴ نمونه‌ی برشی و ۸ نمونه‌ی خمشی در کارگاه ساخته و به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. خلاصه‌ی نتایج به این شرح است:

۱) در همه‌ی نمونه‌ها، جوشکاری با قوس الکتریکی با الکتروود فولادی مقاومت بیشتری هم از لحاظ کشش و هم از لحاظ برش نشان داده است. همچنین از

پانویس‌ها

1. heat affected zone
2. Haagensen
3. Zhang
4. Lin
5. Everett
6. Liao
7. Bodude & Momohjimoh
8. Switzner
9. Civjan
10. Cheng
11. tungsten inert gas
12. metal inert gas
13. Singh
14. Korzec
15. metal active gas

منابع (References)

1. Arivazhagan, N., Singh, S., Prakash, S. and et al. "Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding", *Materials and Design*, **32**(5), pp. 3036-3050 (2011).
2. Phanindra Reddy, M., Aldrin Sam William, S., Mohan Prashanth, M. and et al. "Assessment of mechanical properties of AISI 4140 and AISI 316 dissimilar weldments", *Procedia Engineering*, **75**, pp. 29-33 (2014).
3. Ahmadi, E. and Ebrahimi, A.R. "The effect of activating fluxes on 316L stainless steel weld joint characteristic in TIG welding using the taguchi method", *Advanced Materials and Processing*, **1**(1), pp. 55-62 (2013).

4. Haagensen, P.J., Statnikov, E.S. and Lopez-Martinez, L. "Introductory fatigue tests on welded joints in high strength steel and aluminium improved by various methods including ultrasonic impact treatment (UIT)", *16*, pp.16-19 (2002).
5. Zhang, H.T., Feng, J.C., He, P. and et al. "Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium-zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding-brazing process", *Materials Characterization*, **58**(7), pp. 588-592 (2007).
6. Lin, S.B., Song, J.L., Yang, C.L. and et al. "Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal", *Materials and Design*, **31**(5), pp. 2637-2642 (2010).
7. Criss, E.M. and Meyers, M.A. "Braze welding of cobalt with a silver-copper filler", *Journal of Materials Research and Technology*, **44**(1), pp.44-59 (2015).
8. Liao, F., Wang, W. and Chen, Y. "Ductile fracture prediction for welded steel connections under monotonic loading based on micromechanical fracture criteria", *Journal of Engineering Structures*, **94**, pp. 16-28 (2015).
9. Bodude, M. and Momohjimoh, I. "Studies on effects of welding parameters on the mechanical properties of welded low-carbon steel", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, **3**(03), pp. 142 (2015).
10. Switzner, N., Queiroz, V., Duerst, J. and et al. "Si-bronze to 304 stainless steel GTA weld fusion zone microstructure and mechanical properties", *Materials Science and Engineering: A*, **709**, pp. 55-64 (2018).
11. Civjan, S., Guihan, T. and Peterman, K. "Testing of oxyacetylene weld strength", *Journal of Constructional Steel Research*, **168**, pp. 910-921 (2020).
12. Cheng, Z., Liu, H., Huang, J. and et al. "MIG-TIG double-sided arc welding of copper-stainless steel using different filler metals", *Journal of Manufacturing Processes*, **55**, pp. 208-219 (2020).
13. Singh, R.P., Kumar, S., Dubey, S. and et al. "A review on working and applications of oxy-acetylene gas welding", *Materials Today: Proceedings*, **38**, pp. 34-39 (2021).
14. Korzec, I., Lusiak, T. and Bugaj, M. "Tests of selected mechanical properties of welded joints in rotorcraft", *Transactions on Aerospace Research*, **1**(262), pp. 64-74 (2021).
15. ASTM, INT. ASTM E8/E8M, "Standard Test methods for Tension Testing of Metallic Materials", pp. 1-27 (2016).
16. *Iranian Construction Welding Regulations*, Issue No. **228** (In persian).
17. Code-Steel, Structural Welding "AWS D1. 1/D1. 1M", *American Welding Society* (2020).