

بررسی اثر پارامترهای جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی بر خواص مکانیکی ورق‌های مسی تحت گاز هلیوم

چکیده

در این تحقیق، ورق‌های مسی با شرایط مختلف جوش کاری شامل سرعت‌های مختلف دورانی و انتقالی ابزار و نیز به تعداد یک و دو پاس جوش به روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی به یکدیگر متصل شده‌اند. این جوش کاری‌ها تحت گاز هلیوم به عنوان گاز محافظ انجام شده‌اند. دمیدن گاز هلیوم بر روی جوش‌ها و ابزار جوش کاری سبب می‌شود که از تماس هوا با آن‌ها جلوگیری شود و از اثرات نامطلوبی که هوا بر آن‌ها می‌تواند بگذارد، اجتناب گردد. در این تحقیق به علت نرم بودن فلز مس و نازک بودن ورق‌ها به جای نمونه‌های ضریب شدت تنش بحرانی K_{IC} ، از نمونه‌های انتگرال-J استفاده شده است. این کمیت با ساخت نمونه‌های $C(T)$ اندازه‌گیری شد. نتایج این مطالعه نشان داد که به دلیل وقوع پدیده تبلور مجدد در منطقه اغتشاشی، چقرمگی شکست و سختی ویکرز می‌تواند به ترتیب $41/49\%$ و $52/85\%$ نسبت به فلز پایه افزایش یابند. وقوع پدیده آنیل شدن در ناحیه متأثر از گرما منجر به تنزل خواص ریزساختاری و مکانیکی می‌شود، به گونه‌ای که میزان سختی ویکرز، استحکام نهایی و چقرمگی شکست نسبت به فلز پایه به ترتیب $28/57\%$ ، $33/90\%$ و $10/98\%$ می‌توانند کاهش پیدا کنند. علاوه بر این، نتایج تحقیق نشان داد که برای به دست آوردن یک جوش بهتر، مناسب‌تر است که به جای انجام دو یا چند پاس جوش کاری، فرآیند جوش کاری را در دمای کمتری انجام داد، به گونه‌ای که گرمای کمتری به قطعه کار منتقل شود.

کلمات کلیدی: جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی؛ گاز محافظ هلیوم؛ خواص مکانیکی؛ پارامترهای جوش کاری؛ انتگرال-J

Investigating the Effect of Friction Stir Welding Parameters on the Mechanical Properties of Copper Sheets under Helium Gas

Abstract

In this research, copper sheets with different welding conditions, including different rotational and translational speeds of the tool, as well as the number of one and two welding passes, were connected to each other by friction stir welding method. These weldings were performed under helium gas as a protective gas. Blowing helium gas on welds and welding tools prevents air from coming in contact with them and avoids the adverse effects that air can have on them. In this research, due to the softness of the copper metal and the thinness of the sheets, J-integral samples were used instead of the critical stress intensity coefficient K_{IC} samples. This quantity was measured by making C(T) samples. The results of this study showed that due to the occurrence of recrystallization phenomenon in the stirring zone, fracture toughness and Vickers hardness can increase by 41.49% and 52.85%, respectively, compared to the base metal. The occurrence of annealing phenomenon in the heat-affected area leads to the degradation of microstructural and mechanical properties, so that the Vickers hardness, ultimate strength and fracture toughness decrease by 28.57%, 33.90% and 10.98% compared to the base metal, respectively. In addition, the research results showed that in order to obtain a better weld, it is more appropriate to perform the welding process at a lower temperature instead of two or more welding passes, so that less heat is transferred to the workpiece.

Keywords: Friction stir welding; Helium shielding gas; Mechanical properties; Welding parameters; J-Integral

اخیرا با گسترش کاربرد مس و آلیاژهای آن به عنوان یک فلز سازه‌ای در بیشتر زمینه‌های صنعتی، تقاضا برای جوش کاری آن با یک روش مناسب نیز افزایش یافته است [۱]. به عنوان مثال، مس در تولید کانال‌ها و مجاری استفاده می‌شود [۲] و یا به دلیل مقاومت در برابر خوردگی بالا، در صنعت خطوط لوله آب مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. بنابراین، فلز مس برای مطالعه حاضر انتخاب شده است. جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی^۱ (FSW) به عنوان یک فرآیند اتصال حالت جامد جدید، به طور گسترده‌ای برای اتصال مواد مختلف که جوش کاری ذوبی آن‌ها با استفاده از روش‌های رایج دشوار است، استفاده می‌شود [۴]. جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی که جایگزینی برای روش جوش کاری قوس الکتریکی معمولی است، دارای مزایای منحصر به فردی از جمله نیاز به آماده‌سازی سطح حداقل، راحتی کنترل پارامترهای جوش کاری و قابلیت اتصال فلزات مشابه یا غیر مشابه که اغلب به سختی جوش داده می‌شوند، است [۵]. همچنین، این روش جوش کاری زمان جوش کوتاهی دارد و به راحتی می‌توان آن را خودکار کرد [۶]. این روش برای جوش کاری قطعات آلومینیومی ابداع شد، اما استفاده از آن به سرعت برای بسیاری از مواد دیگر مانند سوپر آلیاژها [۷]، مس و آلیاژهای آن [۸]، انواع فولاد [۹]، تیتانیوم و آلیاژهای آن [۱۰]، بسیاری از انواع مواد پلیمری [۱۱] و هم‌چنین مواد ترموپلاستیک [۱۲] توسعه یافت. روش جوش کاری FSW را می‌توان برای اتصال قطعات مواد مختلف به یکدیگر [۱۳] استفاده نمود. این رویکرد جدید جوش کاری توسط موسسه جوش کاری^۲ (TWI) در انگلستان در سال ۱۹۹۱ ابداع و معرفی شد [۱۴].

پژوهش‌های متعددی در زمینه مطالعه فرآیند جوش کاری به روش اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است. سان و فوجی [۱۵]، اثر افزودن ذرات SiC بر استحکام کششی جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که در یک پاس جوش، استحکام نهایی اتصالات جوش به دلیل ذرات SiC اضافه شده، کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش تعداد پاس‌های جوش کاری، ذرات SiC اضافه شده می‌توانند در منطقه اغتشاشی، بهتر پراکنده شده و استحکام جوش را در مقایسه با شرایط جوش تک پاس افزایش دهند. یعقوبی و شیرازی [۱۶]، ورق‌های مسی را با سرعت‌های مختلف ابزار جوش کاری به هم جوش دادند و خواص جوش‌های حاصل را بررسی نمودند. بر اساس مطالعات ایشان، در ناحیه متأثر از گرما، نرخ رشد ترک خستگی دارای بیشترین مقدار خود است. همچنین، با افزایش تعداد پاس‌های جوش کاری، مقاومت به خوردگی^۳ در ناحیه اغتشاشی افزایش می‌یابد. کحال و همکاران [۱۷]، با استفاده از روش تاگوچی، خواص مکانیکی جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی را بهینه نمودند. ایشان متغیرهایی همچون قطر بین ابزار، سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه انحراف را به عنوان متغیرهای فرآیند در نظر گرفتند و سه کمیت استحکام نهایی، چقرمگی و سختی در منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی را بهینه نمودند.

در پژوهش حاضر، در ابتدا ورق‌های مسی به روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی و با سرعت‌های مختلف دورانی و جابه‌جایی ابزار و تعداد پاس مختلف، به یکدیگر جوش داده می‌شوند. به منظور جلوگیری از اکسید شدن جوش‌ها، این جوش‌کاری‌ها تحت گاز هلیوم انجام می‌شوند. دمیدن این گاز نجیب در حین جوش کاری بر روی ابزار و قطعه کار، سبب می‌شود که از رسیدن اکسیژن به محل جوش جلوگیری شود و اکسید شدن جوش‌ها اتفاق نیفتد چراکه افزایش دما و اکسید شدن جوش باعث تضعیف خواص جوش می‌شود. همچنین ممکن است که ابزار نیز دچار اکسایش شود و دقت خود را از دست بدهد و یا حتی از بین برود. در مرحله بعد، خواص جوش‌هایی که با شرایط مختلف مذکور حاصل شدند، شامل خواص کششی،

¹ Friction Stir Welding

² The Welding Institute

³ Corrosion

سختی ویکرز و چقرمگی شکست و نیز خواص ریزساختاری آن‌ها تعیین می‌شوند و این امکان را می‌دهند تا با مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق و نتایج موجود دیگر در این زمینه، اثر استفاده از گاز هلیوم در جوش کاری به‌عنوان یک گاز محافظ بهتر درک شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- جوش کاری‌ها

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در این تحقیق از مس خالص استفاده شده است. ترکیب شیمیایی این فلز با توجه به آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فلز مس مورد استفاده .

Zn	Co	Cr	Ni	Fe	Al	Mn	P	Sn	Pb	Cu
<۰/۰۲	۰/۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۴	۰/۰۱	ناچیز	۰/۰۱	۰/۰۳	<۰/۰۱	<۰/۰۱	ماده پایه

صفحات مسی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر در ۱۱۰ میلی‌متر از یک ورق بزرگ به ضخامت ۵ میلی‌متر در راستای عمود بر جهت نورد بریده شده‌اند. هر دو نیمه قطعه‌کار، سمباده زده شده و صیقلی شده‌اند. این فرآیندها برای جلوگیری از ایجاد حباب‌های هوا در محل جوش کاری ضروری می‌باشند؛ چرا که در غیر این صورت، حباب‌های هوای به دام افتاده، می‌توانند جوش‌های نهایی را تضعیف نمایند. صفحات مسی اولیه و قالب و متعلقات آن در شکل ۱ نشان داده شده است. قطعه‌کار نشان داده شده در این شکل، یک بار از قبل جوش داده شده و ابزار، برای بار دوم در حال جوش دادن آن است (جوش کاری دو پاس).



شکل ۱: صفحات مسی اولیه و قالب و متعلقات آن.

تقریباً در تمام انواع جوش کاری، پدیده اکسیداسیون یکی از موارد نامطلوب است. بنابراین، همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد، برای محافظت از ناحیه جوش و ابزار پین، گاز محافظ در طول فرآیند جوش کاری با استفاده از شیلنگ گاز بر روی آن‌ها دمیده می‌شود. در این مطالعه، از گاز هلیوم خالص به‌عنوان گاز محافظ برای محافظت از ناحیه جوش کاری و ابزار جوش کاری در مقابل اکسیداسیون استفاده شده است.

در این تحقیق، برای بررسی تاثیر پارامترهای مورد نظر بر روی خواص جوش، فرآیندهای جوش کاری مطابق با شرایط ذکر شده در جدول ۲ انجام شده‌اند. فرآیند جوش کاری با ابزاری متشکل از شانه به قطر ۲۰ میلی‌متر، پین به قطر ۸ میلی‌متر و طول ۴/۷۵ میلی‌متر، انجام شده است. زاویه تورب بین جهت عمودی و محور ابزار نیز ۲ درجه در نظر گرفته شده است. منظور از زاویه تورب، زاویه میان محور ابزار و خط عمود بر صفحه مسی (قطعه کار) است. این زاویه معمولاً بین ۲ تا ۴ درجه در نظر گرفته می‌شود. وجود زاویه تورب سبب می‌شود که بخش عقبی شانه ابزار در قطعه کار فرو رود و ماده را به سمت پایین فشار دهد. به این ترتیب فرآیند فرجینگ اتفاق می‌افتد. لازم به یادآوری است که جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی ترکیبی از فرآیند روزن‌رانی و فرآیند فرجینگ است.

شایان ذکر است که اساس انتخاب پارامترهای جوشکاری، این بوده است که جوش‌های تولید شده توسط آن‌ها بدون عیب و مطلوب (حداقل از لحاظ ظاهری) باشند. اما، چون این پارامترها در بازه نسبتاً کوچکی قرار می‌گیرند لذا، نمی‌توان محدود آن‌ها را خیلی بزرگ در نظر گرفت چراکه اگر این پارامترها خیلی تغییر کنند سبب ایجاد عیوبی در جوش‌های حاصل، می‌شوند. به همین علت در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده، تعداد پارامترهای در نظر گرفته شده تقریباً به همین تعداد می‌باشند.

جدول ۲- شرایط جوش کاری مختلف مورد استفاده در مطالعه حاضر

حالت‌های مختلف جوش کاری	سرعت دورانی (rpm)	سرعت جابه‌جایی (mm/min)
حالت یک	۵۵۰	۵۰
حالت دو	۵۵۰	۱۰۰
حالت سه	۸۵۰	۵۰
حالت چهار (دو پاس)	۵۵۰	۵۰

۲-۲- تعیین مناطق جوش و اندازه دانه‌ها

اگر چه جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی در حالت جامد انجام می‌شود (بدون ذوب ماده) اما به علت انتقال گرما به قطعه کار و تغییر شکل‌های بزرگ، ریزساختار ماده دچار تغییرات قابل توجهی می‌شود که خواص آن را دست‌خوش تغییر می‌کند. این عوامل، یعنی گرما و تغییر شکل‌های بزرگ باعث به وجود آمدن سه ناحیه مختلف در خط جوش می‌شوند. این نواحی عبارت‌اند از: ناحیه متأثر از گرما^۱ (HAZ)، ناحیه متأثر از کار مکانیکی و گرما^۲ (TMAZ) و ناحیه اغتشاشی^۳ (SZ). ناحیه متأثر از گرما: ناحیه متأثر از گرما، دو ناحیه مجزا در دو طرف خط جوش می‌باشد که یک چرخه گرمایی را در حین فرآیند جوش کاری تجربه می‌کنند. گرمای انتقالی به این ناحیه سبب می‌شود که دانه‌بندی آن اندکی درشت‌تر شود و دانه‌ها به طور کامل و یا جزئی به یکدیگر بپیوندند.

ناحیه متأثر از کار مکانیکی و گرما: تغییراتی که در این ناحیه از جوش نسبت به ماده پایه به وجود می‌آید نشأت گرفته از تغییر شکل‌های خمیری ایجاد شده توسط ابزار و نیز گرمای فرآیند جوش کاری می‌باشد. این ناحیه خود به دو قسمت تقسیم

^۱ Heat Affected Zone

^۲ Thermo-Mechanical Affected Zone

^۳ Stir Zone

می‌شود. ناحیه‌ای که در آن دانه‌بندی مجدد رخ می‌دهد و نیز ناحیه‌ای که در آن دانه‌بندی مجدد رخ نمی‌دهد. ناحیه اغتشاشی: بخشی از ناحیه متأثر از کار مکانیکی و گرما است که دچار دانه‌بندی مجدد می‌شود. این بخش در واقع ناحیه‌ای است که بزرگ‌ترین تغییر شکل‌ها در آن رخ می‌دهد.

به‌منظور تعیین اندازه دانه‌ها و سه ناحیه جوش (ناحیه اغتشاشی، ناحیه متأثر از کار مکانیکی و گرما و ناحیه تحت تأثیر گرما)، صفحات مسی جوش داده شده در جهت عمود بر راستای جوش، برش داده شدند. پس از برش، سطح مقطع نمونه‌ها با دقت سمباده زده شده، صیقل خورده و سپس اچ^۱ شدند. محلول مناسب برای اچ کردن فلز مزبور شامل ۳۰ میلی لیتر اسید کلریدریک، ۱۰ گرم کلرید آهن، ۶۰ میلی لیتر آب مقطر و ۶۰ میلی لیتر اتانول می‌باشد. پس از انجام فرآیند اچ، سه ناحیه مختلف جوش کاری توسط میکروسکوپ نوری شناسایی شدند. این مناطق برای تمام شرایط جوش کاری ذکر شده در جدول ۲ تعیین گردیدند. علاوه بر این، اندازه دانه ناحیه اغتشاشی و اندازه دانه متأثر از گرما برای هر یک از شرایط جوش کاری مشخص شدند.

۲-۳- میکروسختی و پیکرز

برای تعیین پروفیل‌های سختی و پیکرز جوش‌ها، از استاندارد ASTM E92 استفاده شده است [۱۸]. بر اساس این استاندارد، بار 200 gf به خط میانی هر نمونه جوش داده شده (در راستای ضخامت) در مدت ۱۵ ثانیه اعمال شد و بدین ترتیب مقادیر سختی و پیکرز برای ناحیه اغتشاشی و اندازه دانه متأثر از گرما برای تمام شرایط جوش کاری و همچنین برای فلز پایه به دست آمدند. برای آن که نتایج به دست دارای دقت کافی باشند، در هر حالت و در هر ناحیه، سختی و پیکرز پنج نقطه اندازه‌گیری شده و سپس از نتایج مربوطه میانگین‌گیری شده است.

۲-۴- خواص کششی

آزمایش‌های کششی با استفاده از دستگاه کشش زوئیک^۲ ۲/۵ تن با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه در دمای محیط انجام شدند. نمونه‌های کششی از صفحات جوش داده شده در امتداد جهت عمود بر خط جوش و براساس استاندارد ASTM E8 بریده شدند [۱۹]. همچنین، بعد از انجام آزمایش‌های کشش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، سطوح شکست نمونه‌های کششی مورد بررسی قرار گرفتند. در این دسته از آزمایش‌ها، برای هر حالت جوش کاری سه نمونه آزمون کشش تهیه شده و تحت آزمون قرار گرفت و از نتیجه‌هایی که به دست آمدند، میانگین گرفته شد.

۲-۵- چقرمگی شکست

برای تعیین چقرمگی شکست از استاندارد ASTM E1820 استفاده شده است. این استاندارد توصیه می‌کند که برای تعیین چقرمگی شکست، به جای نمونه‌های ضریب شدت تنش بحرانی K_{IC} ، از نمونه‌های انتگرال-J استفاده شود [۲۰]. انتگرال-J، یک انتگرال خطی (مستقل از مسیر) در اطراف نوک ترک است که در مبحث مکانیک شکست اهمیت زیادی دارد. استفاده از نمونه‌های K_{IC} برای تعیین چقرمگی شکست، زمانی مناسب است که حالت کرنش صفحه‌ای حاکم باشد. در نمونه‌های جوش داده شده، چون محدودیت ضخامت وجود دارد، نمی‌توان از این کمیت استفاده کرد. بنابراین، استاندارد اجازه می‌دهد که برای

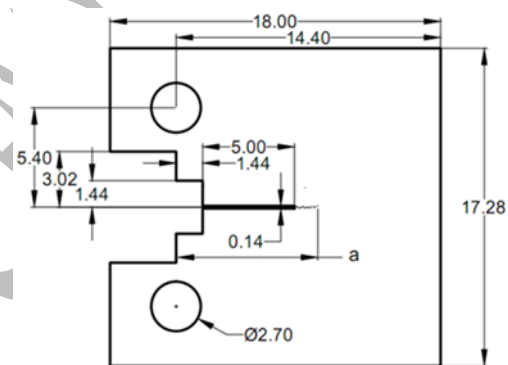
¹ Etching

² Zwick

این منظور از نمونه‌های تعیین انتگرال-J استفاده شود. به همین دلیل، از نمونه‌های C(T) تعیین انتگرال-J استفاده شده است. ابعاد این نمونه‌ها در شکل ۲ (الف) آورده شده‌اند. با توجه به اهمیت بالای ناحیه اغتشاشی و ناحیه متأثر از گرما، در بسیاری از مطالعات، خواص این ناحیه‌ها از جمله چقرمگی شکست این نواحی مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، در تحقیق حاضر، نمونه‌های C(T) به گونه‌ای از قطعه‌کارهای مسی جوش داده شده برش داده شدند که شکاف نمونه‌های مذکور در ناحیه اغتشاشی و یا در ناحیه متأثر از گرما قرار گیرد. نمونه‌های C(T) از فلز پایه نیز تهیه شدند تا به کمک آن‌ها بتوان چقرمگی ماده پایه را نیز اندازه گرفت و با چقرمگی نواحی مختلف جوش مقایسه نمود. قبل از اعمال نیروی کششی به نمونه‌های C(T) و تعیین نمودارهای نیرو-جابجایی آن‌ها، این نمونه‌ها تحت بارگذاری خستگی قرار گرفتند؛ به طوری که یک پیش ترک در انتهای بریدگی آن‌ها ایجاد شد. طول این پیش ترک طبق توصیه استاندارد ASTM E1820 حداقل ۰/۶ میلی‌متر است. بارهای خستگی نیز با استفاده از دستگاه کشش زوئیک ۲/۵ تن اعمال شدند. در این تحقیق، برای آن که بتوان نمونه‌های C(T) را به فک‌های دستگاه بست، گیره‌های ویژه‌ای ساخته شدند. تصویر این گیره‌های ساخته شده، نمونه C(T) تحت آزمایش و فک‌های دستگاه زوئیک در شکل ۲ (ب) نشان داده شده‌اند. شایان ذکر است که برای حصول دقت بیشتر در نتایج به دست آمده، در هر حالت جوش کاری، سه نمونه C(T) ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته و سپس، از داده‌های به دست آمده میانگین‌گیری شده است.



(ب)



(الف)

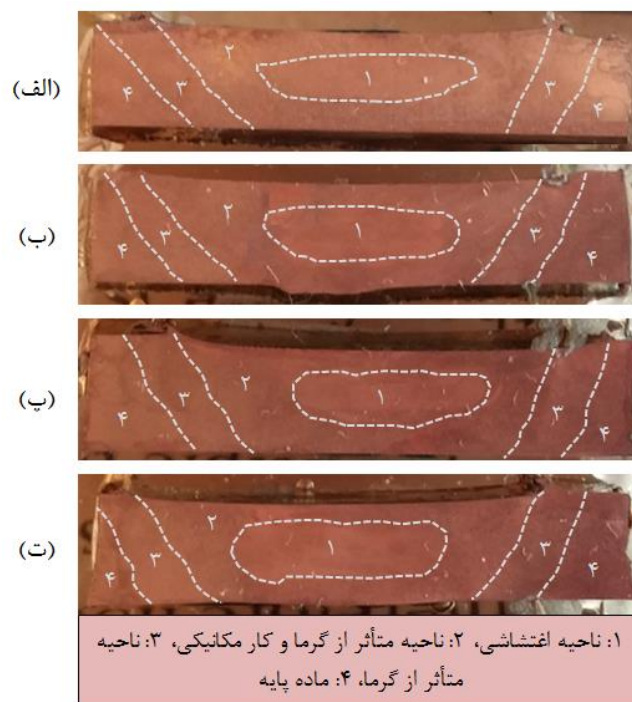
شکل ۲: عملیات مربوط به انجام آزمایش نمونه C(T)، (الف) ابعاد نمونه‌های C(T) و (ب) یک نمونه C(T) که توسط گیره‌های ساخته شده، بر روی دستگاه زوئیک بسته شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار

سطح مقطع برش خورده جوش‌های به دست آمده در شرایط جوش کاری مختلف در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. در این شکل، نواحی مختلف ایجاد شده در خط جوش‌ها نیز که با استفاده از میکروسکوپ نوری مشخص شده‌اند، به چشم می‌خورند. این نواحی شامل ناحیه اغتشاشی، ناحیه متأثر از گرما و کار مکانیکی و نیز ناحیه متأثر از گرما می‌باشند. شکل ۳ نشان می‌دهد که

در حالت سوم جوش کاری، ناحیه اغتشاشی به سمت راست متمایل شده است. در واقع این سمت، سمت پیشرو جوش است که سرعت ابزار در آن بیشتر از سرعت سمت پسرو می باشد. با توجه به این که در حالت سه جوش کاری، سرعت دورانی ابزار برابر 850rpm است و نسبت به سایر حالت ها سرعت بیشتری می باشد، لذا در این حالت ناحیه اغتشاشی به سمت راست متمایل می شود. لازم به ذکر است که در جوش کاری حالت سه، علاوه بر اینکه ناحیه اغتشاشی تمایل بیشتری به سمت پیشروی دارد، کل این ناحیه نیز کمی به سمت طرف پیشرو منتقل شده است. دلیل این پدیده، سرعت چرخش بیش تر در سمت پیشرو نیز می باشد.



شکل ۳: نواحی مختلف حاصل از جوش کاری در حالت های مختلف (الف) حالت یک، (ب) حالت دو، (پ) حالت سه، (ت) حالت چهار.

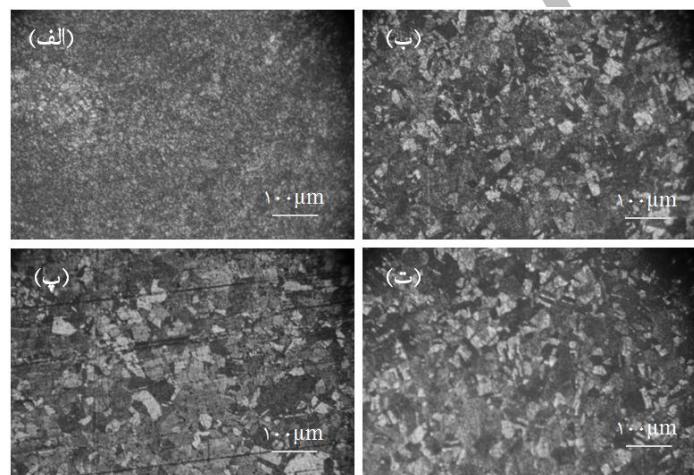
در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، ناحیه متأثر از گرما و کار مکانیکی، یک ناحیه انتقالی بین ناحیه اغتشاشی و ناحیه متأثر از گرما است و خواص آن بین خواص این دو ناحیه می باشد. این موضوع به ویژه در مورد اندازه دانه ها و خواص کششی این نواحی صدق می کند. بر اساس این واقعیت، در تحقیق حاضر بیشتر به خواص ریزساختاری و مکانیکی ناحیه اغتشاشی و ناحیه متأثر از گرما توجه شده است. بنابراین، اندازه دانه آن ها توسط یک میکروسکوپ نوری با استفاده از روش تقاطع خطوط^۱ مشخص شده و در جدول ۳ ارائه شده اند. به عنوان نمونه، تصاویر ریزساختار و دانه بندی فلز پایه، ناحیه متأثر از گرما، ناحیه متأثر از گرما و کار مکانیکی و ناحیه اغتشاشی برای شرایط جوش ۱، به عنوان شرایط جوش پایه در شکل ۴ نشان داده شده است.

¹ Intercept method

جدول ۳: اندازه دانه‌ها و تغییرات آن‌ها نسبت به فلز پایه برای ناحیه متأثر از گرما و ناحیه اغتشاشی برای حالت‌های مختلف

جوش کاری

ناحیه اغتشاشی		ناحیه متأثر از گرما		حالت‌های مختلف جوش کاری
تغییرات نسبت به ماده پایه (%)	اندازه دانه (μm)	تغییرات نسبت به ماده پایه (%)	اندازه دانه (μm)	
-۶۷/۸	۴/۰±۹/۳۲	۱۷/۸	۱۷/۱±۹/۲	حالت یک
-۷۷/۶	۳/۰±۴/۱۵	۸/۶	۱۶/۰±۵/۷	حالت دو
-۲۵/۰	۱۱/۰±۴/۸۴	۴۲/۸	۲۱/۱±۷/۹	حالت سه
-۸۲/۲	۲/۰±۷/۰۸	۳۶/۸	۲۰/۱±۸/۷	حالت چهار
-	۱۵/۰±۲/۸	-	۱۵/۰±۲/۸	ماده پایه

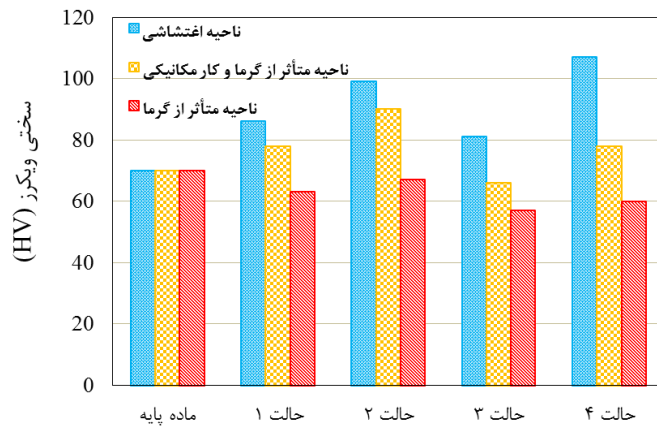


شکل ۴: تصاویر ریزساختارهای (الف) ناحیه اغتشاشی، (ب) ناحیه متأثر از گرما و (پ) ناحیه متأثر از گرما و (ت) ماده پایه برای شرایط جوش کاری ۱.

تمامی اندازه‌هایی که در جدول ۳ ارائه شده‌اند، با توجه به نرخ انتقال گرما به نمونه‌ها در تمامی حالات جوش کاری و توجه به این نکته که کاهش سرعت چرخشی ابزار باعث کاهش سرعت انتقال گرما به نمونه‌های جوش شده می‌شود و همچنین، کاهش سرعت انتقالی ابزار باعث افزایش سرعت انتقال حرارت به نمونه‌ها می‌گردد، قابل توجه هستند. مقایسه بین حالات جوش کاری ۱ و ۲ که سرعت چرخشی آن‌ها یکسان و سرعت انتقال آن‌ها متفاوت است، نشان می‌دهد که افزایش سرعت انتقالی منجر به کاهش اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی و ناحیه متأثر از گرما می‌شود. همچنین، با مقایسه حالات جوش کاری ۱ و ۳ می‌توان دریافت که افزایش سرعت چرخشی ابزار منجر به رشد قابل توجه دانه در هر دو ناحیه ذکر شده، به ویژه در ناحیه اغتشاشی می‌شود. در نهایت، مقایسه حالت جوش کاری ۱ و حالت جوش کاری ۴ که برای بررسی تأثیر تعداد پاس‌های جوش کاری بر رفتار جوش‌ها انجام شده است، نشان می‌دهد که اندازه دانه‌های ناحیه اغتشاشی در شرایط جوش ۴ کوچک‌تر از اندازه دانه‌های ناحیه اغتشاشی در حالت جوش کاری ۱ است. دلیل این امر آن است که پدیده تبلور مجدد دو بار در منطقه اغتشاشی در شرایط جوش کاری ۴ رخ داده است. از طرف دیگر، اندازه دانه‌های ناحیه متأثر از گرما در حالت جوش کاری ۴ بزرگ‌تر از اندازه دانه‌های ناحیه متأثر از گرما در حالت جوش ۱ است؛ چون در ناحیه متأثر از گرمای حالت جوش کاری ۴، پدیده آنیل شدن دو بار رخ داده است، بنابراین اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر می‌باشد.

۲-۳- سختی ویکرز

به منظور تعیین اثر حالت‌های مختلف جوش کاری بر مقادیر سختی و نیز تعیین سختی نواحی مختلف حاصل از جوش کاری، اندازه‌گیری‌های میکروسختی ویکرز انجام شد. داده‌های به دست آمده از این اندازه‌گیری‌ها در شکل ۵ برای نواحی مختلف و ماده پایه ارائه شده‌اند.



شکل ۵: مقادیر سختی ویکرز نواحی مختلف جوش برای حالت‌های مختلف جوش کاری

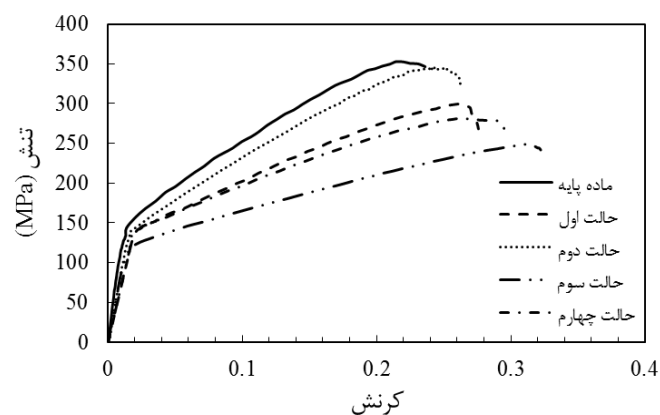
شکل ۵ نشان می‌دهد که به طور کلی، مقادیر سختی ویکرز جوش‌ها با افزایش سرعت انتقال گرما به نمونه‌ها در حالت‌های مختلف جوش کاری کاهش می‌یابد. بنابراین، حداقل سختی را می‌توان در حالت جوش کاری ۳ مشاهده کرد که سرعت چرخش ابزار ۸۵۰ دور در دقیقه است و بنابراین، گرمای قابل توجهی به صفحه جوش منتقل می‌شود. این موضوع برای هر سه ناحیه جوش صادق است. همچنین، در حالت ۲ که سرعت چرخشی ابزار ۵۵۰ دور در دقیقه و سرعت انتقالی آن ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه است (گرمای انتقال یافته به قطعه کار کمتر از سایر حالات جوش کاری می‌باشد)، مقادیر سختی اندازه‌گیری شده به نسبت زیاد است. این امر به دلیل تأثیر سرعت گرمای انتقال یافته به نمونه، بر اندازه دانه‌ها در شرایط مختلف جوش کاری قابل توجه است. بنابراین، به طور کلی می‌توان گفت که هر چه سرعت گرمای منتقل شده به نمونه بیشتر باشد، اندازه دانه بزرگتر و سختی ویکرز نیز کمتر است. علاوه بر این، شکل ۵ نشان می‌دهد که حداکثر مقدار سختی در ناحیه اغتشاشی مربوط به حالت جوش کاری ۴ است. دلیل این امر، وقوع دو بار تبلور مجدد و ریز شدن زیاد دانه‌ها در این ناحیه می‌باشد؛ اگرچه به دلیل عملکرد دو پاس جوش، پدیده رشد دانه نیز دو بار در ناحیه متأثر از گرما رخ می‌دهد و در نتیجه سختی ویکرز در حالت جوش کاری ۴ کمتر از سختی این ناحیه در حالت جوش کاری ۱ است. همان‌طور که انتظار می‌رود، در تمام حالت‌های جوش کاری، مقادیر سختی ناحیه متأثر از گرما و کار مکانیکی بین مقادیر سختی ناحیه اغتشاشی و ناحیه متأثر از گرما است (بر اساس شکل ۵). علت اینکه در ناحیه متأثر از گرما مقدار سختی کاهش پیدا می‌کند آن است که در این ناحیه به علت آنیل شدن ماده، دانه‌بندی درشت‌تر شده و ماده نرم‌تر می‌شود لذا، سختی آن کاهش می‌یابد. روشن است که هر چه مقدار گرمای منتقل شده به قطعه کار بیشتر باشد، شدت آنیل شدن نیز بیشتر خواهد بود و لذا ماده نرم‌تر می‌شود.

۳-۳- خواص کششی

منحنی‌های تنش - کرنش حقیقی فلز پایه و نمونه‌های آزمون کشش ساخته شده از ورق‌هایی که با حالات مختلف جوش کاری

به یکدیگر متصل شده‌اند، در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین، شکل ۷ نمونه‌های گسیخته شده را بعد از انجام آزمون کشش برای شرایط حالت‌های جوش کاری ۱ تا ۴ نشان می‌دهد. تصاویر شکل ۷ نشان می‌دهند که تمام نمونه‌های آزمایش کشش ساخته شده از ورق جوش داده شده، از ناحیه متأثر از گرما شکسته شده‌اند. شکل ۵ نیز نشان داد که ناحیه ناحیه متأثر از گرما، کمترین سختی را در بین تمامی مناطق جوش کاری دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه متأثر از گرما، ضعیف‌ترین ناحیه جوش است. سایر محققان نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند [۲۱، ۲۲]. دلیل این ضعف، رشد دانه‌ها در این منطقه است. این پدیده به علت فرآیند آنیل شدن رخ داده است که دلیل آن اعمال گرما به این ناحیه، یعنی ناحیه متأثر از گرما در حین انجام جوش کاری است.

به منظور مقایسه آسان‌تر خواص کششی فلز پایه و جوش‌ها، نتایج به دست آمده از آزمون‌های کشش در قالب جدول ۴ ارائه شده‌اند. این جدول نشان می‌دهد که بیشترین تنش تسلیم و استحکام نهایی متعلق به فلز پایه است؛ در حالی که میزان کرنش گسیختگی آن از همه کمتر است. علت این امر، وقوع پدیده آنیل شدن در ناحیه متأثر از گرما در نمونه‌های جوش داده شده است. این پدیده به طور کلی منجر به کاهش استحکام کششی و افزایش کرنش گسیختگی می‌شود.



شکل ۶: منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی ماده پایه و حالت‌های مختلف جوش کاری

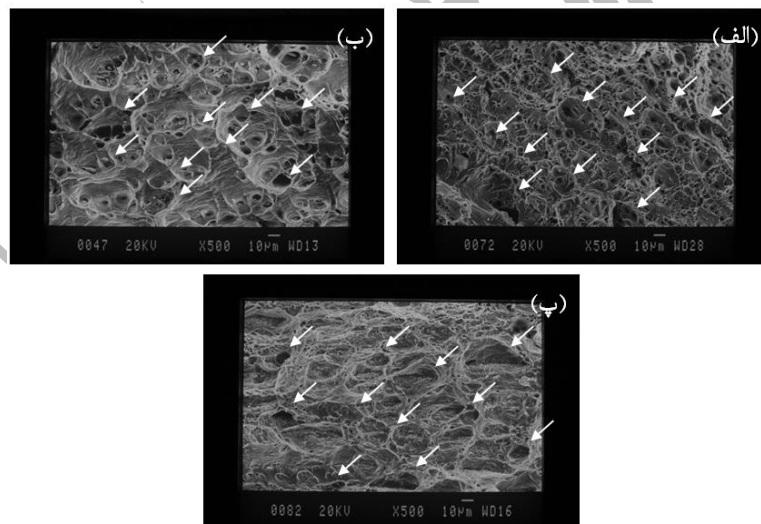


شکل ۷: نمونه‌های آزمایش کشش بعد از گسیخته شدن برای حالت‌های جوش کاری ۱ تا ۴

جدول ۴: خواص کششی جوش‌ها و فلز پایه

حالت جوش کاری	تنش تسلیم (MPa)	تغییرات نسبت به فلز پایه (%)	استحکام نهایی (MPa)	تغییرات نسبت به فلز پایه (%)	کرنش گسیختگی	تغییرات نسبت به فلز پایه (%)
حالت یک	۱۵۷±۱۲	-۸/۷	۳۰۹±۲۱	-۱۶/۰	۰/۲۹±۰/۰۲۵	۱۱/۵
حالت دو	۱۶۱±۱۳	-۶/۴	۳۵۴±۱۹	-۳/۸	۰/۲۷±۰/۰۲۱	۳/۸
حالت سه	۱۳۴±۱۰	-۲۲/۱	۲۴۳±۱۷	-۳۳/۹	۰/۳۵±۰/۰۲۹	۳۴/۶
حالت چهار	۱۴۸±۹	-۱۳/۹	۲۷۸±۲۴	-۲۴/۴	۰/۳۱±۰/۰۱۸	۱۹/۲
ماده پایه	۱۷۲±۱۶	-	۳۶۸±۳۵	-	۰/۲۶±۰/۰۱۶	-

همان‌طور که انتظار می‌رود، بر اساس مقایسه اندازه دانه‌های ذکر شده در جدول ۳، بیشترین تنش تسلیم و بالاترین استحکام نهایی ارائه شده در جدول ۴، متعلق به ماده پایه است. پس از این مقادیر، خواص کششی حالت جوش کاری ۲، حالت جوش کاری ۱، حالت جوش کاری ۴ و حالت جوش کاری ۳ ذکر شده است. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، گسیختگی نمونه‌های آزمون کشش در ناحیه متأثر از گرما رخ می‌دهد. به‌منظور حصول درک بهتری از این گسیختگی‌ها، از سطوح شکست ایجاد شده در نمونه‌های ساخته شده از ماده پایه و نمونه‌های مربوط به حالت‌های ۲ و ۳ جوش کاری، عکس‌های SEM تهیه شده است که این عکس‌ها را می‌توان در شکل ۸ مشاهده نمود. از آنجایی که مس یک فلز شکل‌پذیر است، سطوح شکستگی دارای حفره‌های^۱ میکروسکوپی هستند. وجود این حفره‌ها بیان‌گر وقوع یک شکست نرم هستند. این حفره‌ها را می‌توان به وضوح در تصاویر SEM ارائه شده تشخیص داد.



شکل ۸: تصاویر SEM سطوح شکست نرم برای (الف) فلز پایه، (ب) حالت جوش کاری ۲ و (پ) حالت جوش کاری ۳

شکل ۸ نشان می‌دهد که حفره‌های سطوح شکست نمونه‌های جوش داده شده (شکل‌های ۸ (ب) و ۸ (پ)) بزرگ‌تر از حفره‌های سطح شکست فلز پایه (شکل ۸ (الف)) است. این امر به این دلیل است که دانه‌ها در ناحیه متأثر از گرما به‌علت انجام فرآیند جوش کاری رشد می‌کنند. لذا، به دلیل وجود دانه‌های درشت‌تر، حفره‌های ایجاد شده نیز درشت‌تر هستند. علاوه بر این، مقایسه شکل‌های ۸ (ب) و ۸ (پ) نیز نشان می‌دهد که حفره‌های ایجاد شده در سطح شکست حالت جوش کاری ۳،

^۱ Dimples

بزرگتر از حفره‌های ایجاد شده در سطح شکست حالت جوش کاری ۲ می‌باشند. دلیل این امر آن است که در حالت جوش کاری ۳، سرعت چرخشی ابزار ۸۵۰ دور در دقیقه و سرعت انتقالی آن ۵۰ میلی‌متر در دقیقه است، در حالی که در حالت ۲ سرعت چرخشی ۴۰۰ دور در دقیقه و سرعت انتقالی نیز ۱۰۰ میلی‌متر در دقیقه می‌باشد. این دو عامل، یعنی سرعت چرخشی بیشتر و سرعت انتقالی کوچکتر ابزار در حالت ۳، منجر به انتقال حرارت بیشتر به صفحات مسی در فرآیند جوش کاری می‌شود. بنابراین، در ناحیه متأثر از گرما در حالت جوش کاری ۳، رشد اندازه دانه بیشتری رخ می‌دهد. دانه‌ها در حالت ۳ بزرگتر شده و در نتیجه حفره‌های ناشی از شکستگی نرم نیز بزرگتر می‌گردند. در واقع، گرمای منتقل شده به این ناحیه، منجر به ایجاد دانه‌هایی با ابعاد بزرگتر و در نتیجه تنزل خواص مکانیکی می‌گردد. همان‌طور که شکل ۶ نشان داده شد، منحنی تنش- کرنش ماده پایه بالاتر از منحنی‌های دیگر قرار دارد و نمودار مربوط به حالت جوش کاری ۲ نسبت به سایر نمودارها به آن نزدیکتر است. علاوه بر این، منحنی تنش-کرنش حالت جوش کاری ۳، که در آن سرعت چرخش ابزار بزرگ‌ترین و سرعت انتقالی آن کوچکترین است، پایین‌تر از سایر نمودارها قرار گرفته است. این تغییرات به دلیل وقوع بیشترین آنیل شدن در این حالت است. لذا، منحنی‌های تنش-کرنش حالات جوش ۱ و ۴ بین حالات ۲ و ۳ قرار دارند. همچنین، مقایسه بین حالات جوش کاری ۱ و ۴ نشان می‌دهد که از آنجایی که در حالت جوش ۴ پدیده آنیل شدن دو بار رخ می‌دهد، نمودار تنش-کرنش مربوط به حالت جوش کاری ۴ پایین‌تر از منحنی مربوط به حالت ۱ جوش کاری است. به همین دلیل، می‌توان نتیجه گرفت که برای به‌دست آوردن خواص کششی بهتر، به جای افزایش تعداد پاس‌های جوش، بهتر است که فرآیند جوش کاری را در دمای پایین‌تری انجام داد.

۴-۳- چقرمگی شکست

پس از ایجاد پیش ترک خستگی، تمام نمونه‌های $C(T)$ با استفاده از دستگاه کشش ژوئیک ۲/۵ تنی کشیده شده‌اند. با انجام این کار، نمودارهای نیرو-جابجایی این نمونه‌ها تعیین شدند. این نمودارها در شکل ۹ ارائه شده است. برای به دست آوردن مقادیر انتگرال- J ، می‌توان از معادله (۱) استفاده کرد [۲۰]:

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (1)$$

در این رابطه، J_{el} و J_{pl} به ترتیب بخش الاستیک و پلاستیک انتگرال- J هستند. این معادله را می‌توان به صورت زیر نیز بازنویسی نمود:

$$J = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + J_{pl} \quad (2)$$

در این معادله، K ضریب شدت تنش، ν نسبت پواسون و E مدول یانگ است. مقدار ضریب شدت تنش از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$K_{(i)} = \frac{P_i}{(BB_N W)^{1/2}} f\left(\frac{a_i}{W}\right) \quad (3)$$

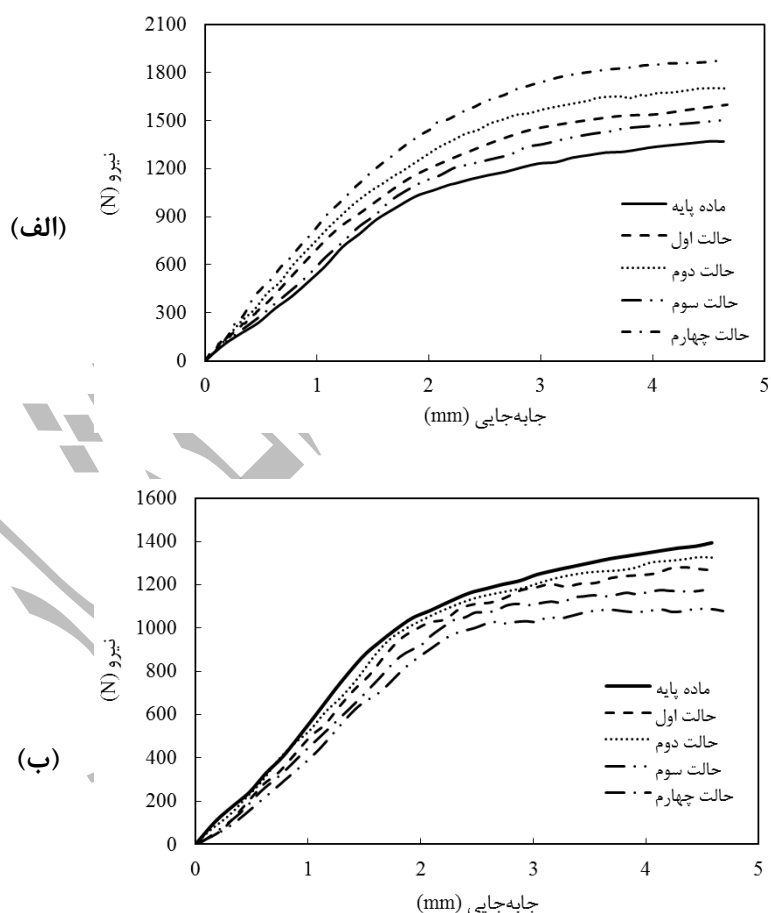
که در آن:

$$f\left(\frac{a_i}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a_i}{W}\right) \left(0.886 + 4.64\left(\frac{a_i}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a_i}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a_i}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a_i}{W}\right)^4\right)}{\left(1 - \frac{a_i}{W}\right)^{3/2}} \quad (4)$$

در معادلات (۳) و (۴)، نیروی کششی اعمال شده به نمونه‌های C(T) در لحظه‌ای است که طول ترک برابر با a_i است. مقدار B ضخامت و B_N ضخامت خالص نمونه است که همان B در نمونه‌های مورد استفاده در این مطالعه است و همچنین W، عرض نمونه‌ها می‌باشد. در شکل ۹، اگر فقط بخش الاستیک منحنی‌ها در نظر گرفته شود، مقادیر J_{IC} و K_{IC} را می‌توان با استفاده از معادله (۲) و معادله (۳) محاسبه نمود.

$$J_{IC} = \frac{K_{IC}^2 (1-\nu^2)}{E} \quad (5)$$

حداکثر مقادیر بار الاستیک (P_{el}) با توجه به شکل ۹ تعیین گردیده و در جدول ۵ گزارش شده است. همچنین، براساس مقادیر به دست آمده برای بار الاستیک و با استفاده از معادله (۳) و معادله (۵)، مقادیر J_{IC} و K_{IC} برای حالت‌های جوش کاری مختلف برای ناحیه متأثر از گرما و ناحیه اغتشاشی نیز تعیین شده‌اند. این پارامترها با توجه به معادلات ذکر شده به دست آمده و در جدول ۵ ارائه شده‌اند. برای محاسبه این کمیت‌ها، مقادیر E و ν به ترتیب برابر ۱۱۹ گیگاپاسکال و ۰/۳۲۶ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۹- نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌های C(T) برای حالت‌های مختلف جوش کاری، (الف) ناحیه اغتشاشی و (ب) ناحیه متأثر از گرما

جدول ۵: حداکثر مقادیر بارهای الاستیک و مقادیر بدست آمده برای J_{IC} و K_{IC}

ناحیه متأثر از دما			ناحیه اغتشاشی			شرایط
K_{IC} (MPa \sqrt{m})	J_{IC} (KJ/m ²)	P_{el} (N)	K_{IC} (MPa \sqrt{m})	J_{IC} (KJ/m ²)	P_{el} (N)	جوش کاری
۲۰/۵۱	۳/۱۶	۹۸۷±۴۹	۲۵/۷۱	۴/۹۶	۱۲۳۷±۵۲	حالت یک
۲۱/۱۳	۳/۳۵	۱۰۱۷±۷۳	۲۷/۷۴	۵/۷۷	۱۳۳۵±۱۲۱	حالت دو
۱۹/۳۷	۲/۸۱	۹۳۲±۵۳	۲۳/۱۳	۴/۰۱	۱۱۱۳±۷۵	حالت سه
۲۰/۲۸	۳/۰۸	۹۷۶±۶۱	۳۰/۷۹	۷/۱۱	۱۴۸۲±۱۲۷	حالت چهار
۲۱/۷۶	۳/۵۵	۱۰۴۷±۸۸	۲۱/۷۶	۳/۵۵	۱۰۴۷±۸۸	ماده پایه

جدول (۵) نشان می‌دهد که در تمام شرایط جوش کاری، چقرمگی شکست ناحیه متأثر از گرما کمتر از چقرمگی شکست ماده پایه و چقرمگی شکست ناحیه اغتشاشی نیز بیشتر از چقرمگی شکست ماده پایه است. به‌عنوان نمونه، در شرایط جوش ۳، چقرمگی شکست ناحیه متأثر از گرما به میزان ۱۰/۹۸ درصد کاهش یافته و در شرایط جوش ۴، این مقدار برای ناحیه اغتشاشی حدود ۴۱/۴۹ درصد نسبت به فلز پایه افزایش یافته است.

در ناحیه متأثر از گرما، به‌دلیل اعمال گرما، مرز دانه‌ها در برخی از دانه‌ها به‌طور جزئی و یا کامل حذف شده و منجر به رشد دانه‌ها می‌شود. بنابراین، خواص مکانیکی ناحیه متأثر از گرما نسبت به فلز پایه تنزل می‌یابد. بدیهی است که این تغییرات به‌علت گرمای انتقال یافته به قطعه‌کار در طی فرآیند جوش کاری است. از سوی دیگر، به‌دلیل تشکیل دانه‌های ریزتر در ناحیه اغتشاشی که به‌علت وقوع پدیده تبلور مجدد اتفاق می‌افتد، ناحیه اغتشاشی، ریزساختاری به شکل دانه‌های هم‌محور و دانه‌های کوچک خواهد داشت. در واقع، چقرمگی شکست، مقاومت یک ماده در برابر ایجاد و رشد ترک است و این مقدار به‌شدت به اندازه دانه‌های مواد بستگی دارد. در یک ماده مشخص، دانه‌های کوچک‌تر از دو جهت بهتر از دانه‌های بزرگتر می‌توانند در برابر رشد ترک مقاومت کنند. اولاً، زمانی که دانه‌ها کوچک هستند، تعداد آن‌ها و در نتیجه تعداد مرزهای آن‌ها بیشتر شده و در واقع، موانع بیشتری بر سر راه مسیر رشد ترک وجود دارد. مشخص است که مرز دانه‌ها به‌عنوان مانع موثر در مسیر رشد ترک عمل می‌کند. ثانیاً، در یک ریزساختار با اندازه دانه‌های کوچک، ریزترک‌های ایجاد شده ریز و کوچک هستند و بنابراین، این ریزترک‌ها نمی‌توانند منجر به تمرکز تنش قابل توجهی شوند. در مقابل، زمانی که دانه‌ها درشت هستند، تمرکز تنش قابل توجه بوده و در ایجاد و گسترش ترک موثرتر است.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، صفحات مسی با استفاده از فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی تحت پارامترهای مختلف جوش کاری با استفاده از گاز محافظ هلیوم به هم متصل شده‌اند. هدف از انجام این مطالعه، بررسی خواص مکانیکی جوش شامل ریزسختی، خواص کششی، چقرمگی شکست و ریزساختار آن‌ها است. با توجه به آنچه در این تحقیق مشاهده گردید، می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

۱- با انجام فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، خواص مکانیکی در ناحیه اغتشاشی بهبود پیدا می‌کند. افزایش تعداد مرز دانه‌ها و کاهش اثر تمرکز تنش باعث می‌شود که چقرمگی شکست در ناحیه اغتشاشی به‌میزان قابل توجهی افزایش یابد. به

عنوان نمونه، در حالت جوش کاری ۴، با دو پاس جوش کاری، چقرمگی شکست ۴۱/۴۹ درصد نسبت به فلز پایه افزایش پیدا نمود.

۲- افزایش تعداد پاس‌های جوش باعث بهبود خواص مکانیکی ناحیه اغتشاشی می‌شود، اما خواص ناحیه متأثر از گرما را که ضعیف‌ترین ناحیه جوش است، کاهش می‌دهد. بر همین اساس، برای به دست آوردن یک جوش با خواص مکانیکی بهتر، پیشنهاد می‌شود به جای انجام دو یا چند پاس جوش کاری، فرآیند جوش کاری در شرایطی انجام شود که سبب انتقال حرارت کمتر به قطعه کار گردد.

۳- وقوع پدیده تبلور مجدد منجر به ریز شدن شدید دانه و کاهش اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی می‌شود. بنابراین، خواص مکانیکی این ناحیه به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. به عنوان نمونه، در حالت جوش کاری ۴ با دو پاس جوش، سختی ویکرز در ناحیه اغتشاشی نسبت به فلز پایه ۵۲/۸۵ درصد افزایش یافت. از سوی دیگر، وقوع پدیده آنیل شدن منجر به کاهش خواص ریزساختاری و مکانیکی می‌شود. لذا، مثلاً در حالت جوش کاری ۳ در ناحیه متأثر از گرما، سختی ویکرز ۲۸/۵۷ درصد، استحکام نهایی ۳۳/۹ درصد و چقرمگی شکست ۱۰/۹۸ درصد نسبت به فلز پایه کاهش پیدا نمودند.

۴- سرعت چرخشی و انتقالی ابزار از عوامل مهم بوده و نقش تعیین کننده‌ای در خواص ریزساختاری و مکانیکی جوش‌ها دارند. این پارامترها بر میزان گرمای منتقل شده به قطعه کار تأثیر می‌گذارند و در نتیجه ویژگی‌های ذکر شده را تغییر می‌دهند. به عنوان نمونه، در حالت جوش کاری ۳ به علت سرعت چرخشی بالای ابزار، دانه‌ها در ناحیه متأثر از گرما نسبت به اندازه دانه فلز پایه ۴۲/۸ درصد رشد نمودند، در حالی که این رشد دانه در حالت جوش کاری ۲ تنها ۸/۶ درصد بود.

مراجع

- [1] Y. F. Sun and H. Fujii, "Investigation of the welding parameter dependent microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure copper," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, pp. 6879-6886, (2010).
- [2] B. Zareh, M. Bakhshi, A.H. Gorji, and S. Nourouzi, "Analysis of forming parameters in sheet hydro-forming process," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 1, pp. 33-52, (1391), (In Persian).
- [3] G. Payganeh, Q. Malekzadeh Fard, J. Shahbazi Karami, and O. Chaeichi Siqahkal, "Experimental study and simulation of tube hydroforming process of bi-layered aluminum-copper with axial feeding," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 2, pp. 65-84, (1398), (In Persian).
- [4] B. Murugan and S. Kundu, "Study on microstructure, mechanical, and electrochemical behaviour of friction stir welded joints between aluminium and 304 stainless steel," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 1, 6016515, (2018).
- [5] A. Ozer, A. Sik, B. Cevik, and M. Ozer, "The effect of friction stir welding parameters on microstructure and fatigue strength of CuZn37 brass alloys," *Kovove Materialy*, vol. 55, pp. 107-114, (2017).

- [6] K. Praneetha, M. Apoorva, T. Prasanna Laxmi, S. Ravi Sekhar, and S. Sravan Sashank, "Experimental investigation on aluminium alloy AA6082 and AA2014 using the friction stir welding," *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, no. 6, pp. 3397-3404, (2022).
- [7] M. Atashparva, and M. Hamed, "Investigating the effect of film in SSRSW of hastelloy X superalloy," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 1, pp. 129-140, (1397), (In Persian).
- [8] P. Harisha, H. M. Nanjundaswamy, H. N. Divakar, and D. Krishnan, "Tensile properties of aluminium and copper alloys friction stir welded joints," *Materials Today: Proceedings*, vol. 54, pp. 223-227, (2021).
- [9] M. Mashayekhi, and H. Hedayati, "Effect of welding sequence and hydrotest process on welding residual stresses in stainless steel SUS304 pipes," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 2, pp. 17-34, (1390), (In Persian).
- [10] F. Gao, Y. Guo, W. Yu, P. Jiang, and Z. Liao, "Microstructure evolution of friction stir welding of Ti6321 titanium alloy based on the weld temperature below microstructure transformation temperature," *Materials Characterization*, vol. 177, 111121, (2021).
- [11] A. A. E. Sidhom, S. A. R. Naga, and A. M. Kamal, "Friction stir spot welding of similar and dissimilar high density polyethylene and polypropylene sheets," *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, vol. 4, p. 100076, (2022).
- [12] A. Paoletti, F. Lambiase, and A. Di Ilio, "Optimization of friction stir welding of thermoplastics," *Procedia CIRP*, vol. 33, pp. 562-567, (2015).
- [13] M.R. Ojnordy and F. Kolahan, "Numerical analysis and experimental study on friction stir welding (Case studies on aluminum alloy and mild steel)," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 2, pp. 263-253, (1397), (In Persian).
- [14] H.L. Qin, H. Zhang, D.T. Sun and Q.Y. Zhuang, "Corrosion behavior of friction-stir-welding joints of 2A14-T6 aluminum alloy," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 22, pp. 627-638, (2015).
- [15] Y. F. Sun and H. Fujii, "The effect of SiC particles on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure copper joints," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, pp. 5470-5475, (2011).
- [16] S. Yaghoubi and A. Shirazi, "Mechanical properties and corrosion behavior of friction stir welded copper plates under shielding gas," *International Journal of Fatigue*, vol. 152, 106419, (2021).
- [17] P. Kahhal, M. Ghasemi and M. Kashfi, "The Multi-Objective Optimization of the Friction Stir Welding using the Taguchi Design Method, the Response Surface Model and the Particle Swarm Algorithm," *Scientific Journal of Aerospace Mechanics*, vol. 17, no. 4, pp. 39-54, (2021), (In Persian).
- [18] "ASTM E92-17 Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA," (2016).
- [19] "ASTM E8 / E8M-16a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA," (2016).
- [20] "ASTM E1820 Standard Test Methods for Fracture toughness Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA," (2016.)

- [21] W. B. Lee and S. B. Jung, "The joint properties of copper by friction stir welding," *Materials Letters*, vol. 58, pp. 1041-1046, (2004).
- [22] A. Azizi, R. V. Barenji, A. V. Barenji, and M. Hashemipour, "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded thick pure copper plates," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, pp. 1985-1995, (2016).

واژه‌نامه

ASTM	انجمن مواد و آزمون آمریکا
Dimples	حفره‌ها
C(T)	نمونه کششی فشرده
Corrosion	خوردگی
Etching	اچ کردن
FSW	جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی
HAZ	ناحیه متأثر از گرما
Interception method	روش تقاطع خطوط
SEM	میکروسکوپ الکترونی روبشی
SiC	کاربید سیلیسیم
SZ	ناحیه اغتشاشی
TMAZ	ناحیه متأثر از کار مکانیکی و گرما
TWI	موسسه جوش کاری
ZWICK	زوئیک

فهرست علائم

a	طول ترک
a_i	یک طول ترک خاص (طول ترک مورد نظر)
B	ضخامت نمونه
B_N	ضخامت خالص نمونه
E	مدول یانگ
J_{el}	مقدار الاستیک انتگرال-J
J_{pl}	مقدار پلاستیک انتگرال-J
J_{IC}	مقدار بحرانی انتگرال-J
K	ضریب شدت تنش
$K_{(i)}$	ضریب شدت تنش زمانی که طول ترک a_i است
K_{IC}	چقرمگی شکست
P_i	نیرو زمانی که طول ترک a_i است
W	عرض نمونه
ν	ضریب پواسون

نسخه پیش انتشار