نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال هفتم، شماره1، بهار و تابستان 1400، صفحه 60-51

اثر تعداد پاس و سرعت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی خوردگی مس خالص تجاری

مجتبی وکیلی ازغندی[1*]، علی شیرازی[2]

1- گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، خراسان رضوی، ایران

2- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

(دریافت مقاله: 1399/12/17؛ پذیرش مقاله: 1400/05/01)

چکیده

در تحقیق حاضر ورق‌های مسی با استفاده از روش جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی و با شرایط مختلفی شامل سرعت‌ها و تعداد پاس‌های مختلف جوشکاری به هم متصل شدند. نتایج نشان دادند که سختی و استحکام کششی ناحیه متاثر از گرما به‌عنوان ضعیف‌ترین ناحیه جوش در برخی از نمونه‌ها تا 30 درصد نسبت به فلز پایه کاهش داشته است. ازطرفی کاهش سرعت دوران، افزایش سرعت جابجایی ابزار و افزایش تعداد پاس جوشکاری سبب ریزدانه سازی و بهبود خواص مکانیکی می‌شوند. ولی اثر کاهش سرعت دوران و افزایش سرعت جابجایی ابزار به‌علت تولید حرارت کمتر مطلوب‌تر نشان داده شد. به‌طوری‌که ضمن افزایش سختی از 90 به 125 ویکرز در نمونه جوشکاری شده با سرعت دوران 600 دور بر دقیقه و سرعت جابجایی 80 میلی‌متر بر دقیقه، میزان افت سختی در نواحی اطراف جوش همین نمونه معادل فقط 5 ویکرز بوده است. همچنین مشخص شد که کاهش در اندازه دانه‌های ناحیه اغتشاشی، ضمن بهبود خواص مکانیکی منجر به افزایش چگالی لایه روئین، جلوگیری از حمله یون‌های مخرب کلر و در نتیجه کاهش 50 برابری شدت خوردگی در محیط آب شور دریا می‌شود.

کلمات کلیدی: مس، جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی، میکروسختی، ریزساختار، استحکام کششی، خوردگی.

Effect of Speed and Number of Pass in Friction Stir Welding on the Mechanical and corrosion behavior of Commercial Pure Copper

M. Vakili-Azghandi[1*], A. Shirazi[2]

1-Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran

2-Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(Received 7 March 2021 ; Accepted 23 July 2021)

Abstract

The results showed that the microhardness and tensile strength of the heat-affected zone as the weakest welding zone in some samples reduced up to 30% compared to the base metal. On the other hand, a decrease in rotational speed, an increase in tool movement speed, and the number of welding passes cause grain refinement and improve mechanical

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mvakili@gonabad.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.5.6]

properties. However, the effect of decreasing the rotation speed and increasing the tool movement speed were shown to be more favorable due to less heat production. Accordingly, the hardness in the welded zone with a rotational speed of 600 rpm and a movement of 80 mm/min increased from 90 to 125 HV compared to the base metal, and the hardness reduction in the zones around the welded zone was only 5 Vickers. It was also found that reducing the grain size of the stir zone, while improving the mechanical properties leads to increasing the density of the surface pasive layer, preventing the attack of aggressive chlorine ions and thus reducing the corrosion intensity by 50 times in saline seawater.

Keywords: Copper, Friction Stir Welding, Microhardness, Microstructure, Tensile Strength, Corrosion.

1- مقدمه

فرایند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی یک روش اتصال حالت جامد با کارایی بالا است که به علت فواید ویژه‌ای که دارد کاربرد آن به سرعت برای مواد مختلف نظیر مس گسترش یافته است [1]. در این فرایند جوشکاری، یک ابزار ساده و غیرمصرفی می‌چرخد و گرما و انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک اتصال جوشکاری مناسب را تولید می‌کند بنابراین، جوشکاری در حالت جامد انجام می‌شود [2]. لذا، جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی می‌تواند مشکلات موجود در روش‌های جوشکاری ذوبی را از بین ببرد. از طرفی برخی مکانیزم‌های استحکام بخشی مانند آلیاژسازی و یا جوشکاری با فلزپرکننده متفاوت منجر به کاهش شدید در برخی خواص فیزیکی مانند رسانندگی الکتریکی مس می‌شود. لذا فرایندهای تولیدی که منجر به عدم تغییر در آنالیز شیمیایی فلز مس شوند حائز اهمیت زیادی هستند [3]. این مزیت منجر به استفاده از این روش در صنایع مختلف مانند صنایع پتروشیمی [4] و هوا فضا [5] شده است.

ویژگی‌های خاص فلز مس از جمله رسانایی حرارتی و الکتریکی خوب، مقاومت بالا در برابر خوردگی و شکل پذیری و استحکام مطلوب، این ماده را به فلزی قابل استفاده در بسیاری از صنایع مختلف تبدیل کرده است [6, 7]. علاوه بر این، با افزایش استفاده از مس و آلیاژهای مس در صنعت، تقاضا برای جوشکاری این فلز نیز افزایش یافته است [8, 9]. بنابراین، در این مطالعه مس به عنوان ماده مورد مطالعه انتخاب شده است.

علوی‌نیا و شیرازی اثرات پارامترهای جوشکاری، از جمله سرعت چرخشی و جابه‌جایی ابزار را بر ویژگی‌های ریزساختاری و مکانیکی صفحات مس بررسی کردند [10]. همچنین، آن‌ها آزمایش‌های شارپی را بر روی صفحات مس جوش داده شده و فلز پایه انجام دادند. علوی نیا و شیرازی دریافتند زمانی‌که انتقال گرمای کمتری به قطعه‌کار در طی فرایند جوشکاری صورت می‌گیرد خصوصیات بهتری حاصل می‌شود. علاوه بر این، مشخص شد که دو نیمه قطعه‌کار باید با دقت در کنار هم قرار گیرند تا از وجود هوای محبوس شده که می‌تواند خواص کششی جوش را ضعیف کند، جلوگیری شود. لی و همکاران اتصالات لب به لب غیر مشابه آلومینیم و مس را با استفاده از جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی نقطه‌ای با مدت زمان‌های مختلف تولید کردند [11]. با انجام مطالعه آن‌ها، مشخص شد که افزایش زمان جوشکاری منجر به افزایش گرمای ورودی در هنگام جوشکاری می‌شود و باعث رشد ترکیبات بین فلزی می‌شود. بنابراین، سختی جوش در مناطق مختلف جوشکاری متفاوت خواهد بود. مقادیر سختی در منطقه اغتشاشی به دلیل توزیع ذرات ترکیبات بین فلزی و وجود دانه‌های ریز شده بسیار بیشتر است. ناگابارام و همکاران اثرات سرعت چرخش ابزار و سرعت جابه‌جایی آن را بر خصوصیات مکانیکی صفحات مس جوش داده شده، مطالعه کردند [12]. برای این منظور، آن‌ها از سرعت‌های چرخشی 910 دور در دقیقه و 1130 دور در دقیقه و سرعت حرکت 30 میلی‌متر در دقیقه و 40 میلی‌متر در دقیقه استفاده نمودند. این محققین دریافتند که خواص کششی اتصالات ساخته شده با استفاده از سرعت چرخش 910 دور در دقیقه و سرعت حرکت 30 میلی‌متر در دقیقه از خواص کششی سایر اتصالات بهتر است.

در پژوهش حاضر، صفحات مسی با استفاده از روش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.5.6]

جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی، به یکدیگر جوش داده شدند و اثرات سرعت چرخشی، سرعت جابه‌جایی ابزار جوشکاری و تعداد پاس‌های این فرایند بر تغییرات ریزساختاری بررسی شد تا بتواند اثر متقابل پارامترهای ذکر شده مشخص شود.

همچنین، اثرات این پارامترها بر روی خواص مکانیکی و خوردگی صفحات جوش داده شده بررسی گردید تا بتواند ضمن تایید تغییرات ریز ساختاری، نتایج کاربردی را نیز ارایه دهد.

2- مواد و روش آزمایش

2-1- فرایند جوشکاری

در این مطالعه مس به شکل صفحات تجاری برای بررسی انتخاب شد. ترکیب شیمیایی این ماده در جدول (1) ارایه شده است. برای انجام فرایند جوشکاری، صفحات مسی با ضخامت 4 میلی‌متر عمود بر جهت نورد آن‌ها به ابعاد 50 میلی‌متر در 100 میلی‌متر برش داده شدند تا هر صفحه برش خورده یک نیم صفحه جوشکاری باشد.

جدول 1- آنالیز شیمیایی ورق‌های مس جوشکاری شده.

Ag	P	Sn	Pb	Zn	Cu
ناچیز	0/02	<0/01	<0/01	<0/01	فلز پایه



شکل 1- قالب جوشکاری مجهز به سیستم خنک‌کننده.

برای ایجاد جوش در بین ورق‌های مسی از یک قالب و ابزار که تصویر آن‌ها در شکل (1) نشان داده شده استفاده گردیده است. این قالب به صورت آبگرد ساخته شده است و آب می‌تواند با عبور از آن سبب خنک شدن قطعه‌کار در حین انجام فرایند شود. در بسیاری از مراجع گفته شده است که انجام فرایند خنک‌کاری سبب بهبود خواص جوش‌های حاصل می‌گردد [13, 14] لذا طبق شکل (1) آب از لوله سیاه وارد قالب می‌شود و از طریق لوله سفید از آن خارج می‌گردد. برای انجام فرایند جوشکاری از یک ابزار فولادی سخت شده با قطر شانه 15 میلی‌متر، قطر پین 6 میلی‌متر و طول پین 3/7 میلی‌متر استفاده شده است.

پارامترهای مختلف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برابر جدول (2) به کار گرفته شده است تا بتواند اثر سرعت دوران ابزار، سرعت جابجایی ابزار و همچنین تعداد پاس را بدست مشخص کند. هر نمونه تولید شده با یک کد مرتبط مشخص و در همین جدول نشان داده شده است.

جدول 2- پارامترهای مورد استفاده برای جوشکاری مس.

شرایط جوشکاری	سرعت دورانی (rpm)	سرعت جابه‌جایی (mm/min)
W.C.1	600	40
W.C.2	600	80
W.C.3	900	40
W.C.4	600	40

2-2- مشخصه‌یابی ریزساختار

به منظور تعیین مناطق مختلف حاصل از جوشکاری تحت شرایط مختلف جوشکاری و تعیین اندازه دانه‌های آن‌ها، صفحات مس جوش داده شده عمود برخط جوش برش داده شدند. در مرحله بعدی، سطح مقطع نمونه‌ها سنباده زده، صیقل داده و اچ شدند. بنابراین، مناطق مختلف جوشکاری صفحات شامل منطقه جوش، منطقه تحت تأثیر گرما و منطقه تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی را می‌توان براساس شکل و اندازه دانه‌های آن‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری تعیین کرد. از تصویر نواحی مختلف جوش می‌توان دانه‌بندی ناحیه و نمونه مورد نظر را مشخص کرد. این عمل با کشیدن دایره‌های فرزی روی تصویر ناحیه مشخص و بدست آوردن مساحت دایره و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.5.6]

تعداد دانه‌های موجود در این دایره انجام می‌شود.

2-3- سختی‌سنجی ویکرز

بعد از اینکه صفحات بهم جوش داده شدند و عمود بر خط جوش برش خوردند و میکروسختی ویکرز آن‌ها در مسیری عمود بر خط جوش و از قسمت مرکزی ضخامت صفحات اندازه گیری شد. برای این منظور از استانداردهای ASTM E92 استفاده شد و سختی ویکرز نمونه‌های برش خورده در نواحی مختلف حاصل از جوشکاری با شرایط مختلف تعیین شدند.

2-4- آزمون کشش

نمونه‌های آزمون کششی دمبلی شکل با استفاده از روش ماشین‌کاری با دستگاه وایرکات در جهت عمود بر خط جوش ساخته شدند تا همه نواحی جوش در طول سنجه قرار گیرد. طول سنجه و عرض سنجه نمونه‌های آزمون کششی به ترتیب 32 میلی‌متر و 6 میلی‌متر بودند. آزمایش‌های کششی با استفاده از دستگاه تست Zwick 2/5 تنی و بر اساس استاندارد ASTM E8 انجام شدند. سرعت حرکت فک دستگاه تست کشش در این آزمایش‌ها نیز برابر 2 میلی‌متر در دقیقه بود.

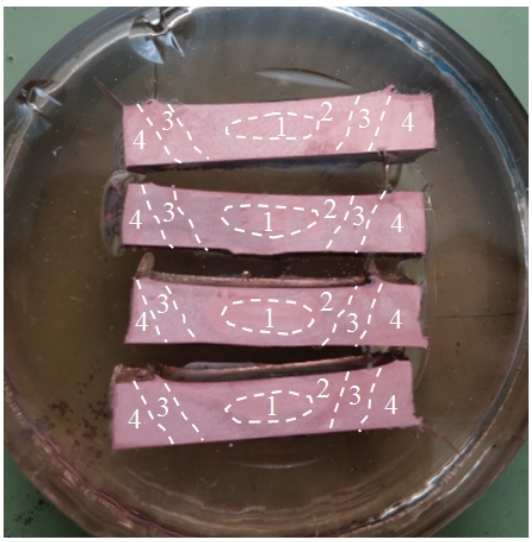
2-5- آزمون خوردگی

برای مطالعه و مقایسه رفتار خوردگی نمونه‌های مس جوش خورده با همدیگر، آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی در محلول 3/5 درصد وزنی NaCl به عنوان محلول شبیه سازی آب دریا انجام شد. این آزمایش‌های الکتروشیمیایی با استفاده از روش 3 الکترود انجام شد که در آن به‌ترتیب از یک سیم نقره در محلول اشباع AgCl، یک میله پلاتین و نمونه‌های آزمایش به ترتیب به عنوان الکترود مرجع، شمارش‌گر و کار استفاده شد. برای تهیه نمونه مورد آزمایش، سطح جوش تا سمباده شماره 1200 پرداخت شد و مقطعی ناحیه جوش معادل 1 سانتی‌متر مربع در معرض محلول خورنده قرار گرفت. قبل از آزمایش و برای دستیابی به حالت پایدار، نمونه‌های در نظر گرفته شده به مدت 1 ساعت در معرض محلول NaCl تحت شرایط پتانسیل مدار باز قرار گرفت. سپس با استفاده از پتانسیواستات Radstat 1 از پتانسیل 250- میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز، آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی بر روی نمونه‌ها با سرعت اسکن 2 میلی ولت در ثانیه انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- ریزساختار

مناطق مختلف حاصل از انجام فرایند جوشکاری در شرایط مختلف، در شکل (2) ارایه شده است. علامتگذاری‌های 1، 2، 3، و 4 روی نمونه‌ها به ترتیب نشان دهنده نواحی اغتشاشی، متاثر از گرما، متاثر از عملیات ترمومکانیکی و فلز پایه می‌باشند. این شکل نشان می‌دهد که ناحیه اغتشاشی در هر چهار حالت کمی به سمت راست تغییر مکان داده است. این امر حاکی از این است که سرعت حرکت مواد در اطراف ابزار در سمت راست (سمت پیشرو) بیشتر از سمت چپ (سمت پسرو) است.



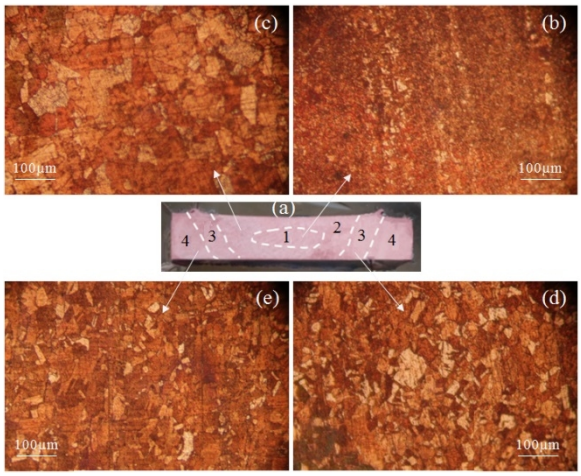
شکل 2- مناطق مختلف حاصل از انجام فرایند جوشکاری با شرایط مختلف جوشکاری، به‌ترتیب از بالا به پایین، W.C.1، W.C.2، W.C.3 و W.C.4. 1- ناحیه اغتشاشی، 2-ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی، 3- ناحیه متأثر از گرما و 4- ماده پایه).

همچنین شکل (2) نشان می‌دهد که ناحیه اغتشاشی خود بخشی از ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی است که در آن تنش مکانیکی شدید و تمرکز بالایی از حرارت منجر به کرنش شدید و در نتیجه فوق ریزدانه سازی شده است. میزان تنش و حرارت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.5.6]

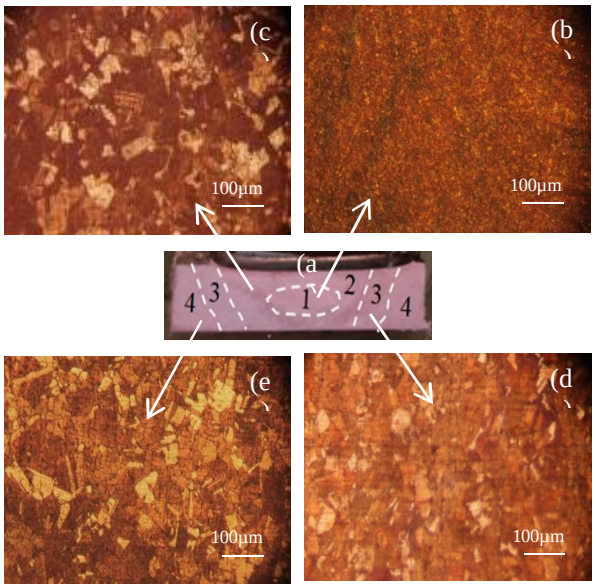
اعمالی در ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی کاهش یافته و می تواند منجر به تغییرات ریزساختاری کمتری نسبت به ناحیه اغتشاشی در فلز پایه شود. ناحیه متأثر از گرما جوش نیز در دو طرف ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی واقع شده است. این ناحیه صرفا تحت تاثیر حرارت می تواند متحمل پدیده‌هایی مانند بازیابی و رشد دانه شود. با فاصله گرفتن از این نواحی وارد ناحیه فلزپایه می‌شویم که طی فرایند جوشکاری دچار هیچ تغییری نشده است.

برای تبیین بهتر اثرات ریزساختاری، تصویر میکروسکوپی فلزپایه و مناطق مختلف جوشکاری برای شرایط جوشکاری W.C.1 و W.C.4 به ترتیب در شکل‌های (3) و (4) ارایه شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که دانه‌های ناحیه اغتشاشی جوش بسیار کوچک‌تر از دانه‌های ماده پایه و سایر مناطق جوش هستند.



شکل 3- تصاویر ریزساختار فلز پایه و مناطق مختلف جوشکاری برای شرایط جوشکاری W.C.1.

دلیل این امر وقوع پدیده‌های ریزدانه سازی تحت تاثیر تغییرشکل پلاستیک شدید در این ناحیه می باشد. مکانیزم پیشنهادی جهت ریزدانه شدن این ناحیه تبلور مجدد دینامیکی است. این امر معلول انرژی نقص در چیدمان اتمی کم در مس نسبت به دیگر فلزات و آلیاژها می باشد. در این شرایط ریز شدن دانه در سه مرحله اتفاق می‌افتد. در مرحله یک، سیستم‌های صفحات لغزش می‌توانند بدلیل تغییر شکل شدید پلاستیک ایجاد شده در اثر فرایند اغتشاشی اصطکاکی فعال شوند و سلول‌های نابجایی در دانه‌های اصلی تشکیل گردند. در مرحله دو، این سلول‌های نابجایی زیر مرزهایی با جهت‌گیری زاویه کم تولید می‌کنند که مشخصه آن‌ها مرزهای تغییر شکل یافته است. سرانجام، در مرحله سه، دانه‌هایی با مرزهای بزرگ زاویه ایجاد می‌شوند که با افزایش زاویه عدم انطباق اتفاق همراه است [15, 16].



شکل 4- تصاویر ریزساختار فلز پایه و مناطق مختلف جوشکاری برای شرایط جوشکاری W.C.4.

در فلزات و آلیاژهای با انرژی نقص چیدمان اتمی بالا، مکانیزم‌های بازیابی توسعه یافته می‌تواند پدیده قالب در ریزدانه سازی باشد. همچنین، این شکل‌ها نشان می‌دهند که دانه‌های ناحیه متأثر از گرما و کار مکانیکی و ناحیه متأثر از گرما بزرگ‌تر از دانه‌های ماده پایه می‌باشند. این شواهد حاکی از اثر مخرب انتقال حرارت تولید شده در ناحیه جوش به اطراف می‌باشد. گرمای ذکر شده می‌تواند منجر به رشد دانه و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی این نواحی شود.

در ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی، یک عامل محرک در رشد دانه و یک عامل محرک در کاهش اندازه دانه به‌طور همزمان عمل می‌کنند. گرمای اعمالی که سبب رشد دانه‌ها و در نتیجه تنزل خواص مکانیکی در این ناحیه می‌شود و از طرفی تنش مکانیکی اعمالی سبب وقوع پدیده کرنش‌سختی و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.5.6]

تا حدی کشیدگی دانه‌ها در این ناحیه می‌شود. این دو عامل تا حد زیادی اثرات یکدیگر را خنثی می‌کنند. بنابراین تغییرات ریزساختاری در ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی بسیار اندک بوده و لذا خواص این ناحیه نیز تغییرات چندانی پیدا نمی‌کند و در کاهش و یا افزایش خواص جوش تاثیر چندانی ندارد. بر این اساس، در این پژوهش بیشتر به تغییرات ریزساختاری ناحیه اغتشاشی و ناحیه متأثر از گرما پرداخته می‌شود. اندازه دانه‌های این دو منطقه در همه نمونه‌های مورد آزمایش به‌همراه فلز پایه در جدول (3) ارایه شده است.

جدول 3- اندازه دانه‌های ناحیه اغتشاشی و ناحیه متاثر از گرما.

شرایط جوشکاری	ناحیه متاثر از گرما		ناحیه اغتشاشی	
	اندازه دانه (µm)	تغییرات نسبت به ماده پایه (%)	اندازه دانه (µm)	تغییرات نسبت به ماده پایه (%)
W.C.1	19/4	20/5	3/9	-75/8
W.C.2	17/5	8/7	2/5	-84/4
W.C.3	22/3	37/5	11/8	-26/7
W.C.4	21/7	34/8	2/3	-85/7
ماده پایه	16/1	-	16/1	-

همانطور که در جدول (3) نشان داده شده است در همه شرایط جوشکاری، اندازه دانه‌های ناحیه اغتشاشی کوچکتر از اندازه دانه‌های ماده پایه هستند. افزایش سرعت دوران و یا کاهش سرعت جابجایی ابزار منجر به افزایش تولید و تمرکز حرارت در ناحیه جوش می‌شود. این امر منجر به افزایش اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی شده است. حرارت زیاد و کافی می تواند منجر به کامل شده پدیده تبلور مجدد دینامیکی و در ادامه منجر به رشد دانه های تبلور مجدد یافته شود. از طرفی تکرار فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر ناحیه جوشکاری شده می تواند سبب اعمال مجدد کرنش شدید در ناحیه اغتشاشی شده که این امر منجر به ریزدانه‌سازی بیشتر در این ناحیه می‌گردد. این امر منجر به ریز شدن دانه‌ها تا 2/3 میکرومتر می‌شود که بیشترین کاهش اندازه دانه نسبت به فلز پایه (16/1 میکرومتر) بحساب می‌آید. در همه نمونه‌های جوشکاری شده، متوسط اندازه دانه نواحی متاثر از گرما، بزرگتر از اندازه دانه فلز پایه است. تمام اندازه دانه‌های ارایه شده در جدول (3) با توجه به مقدار حرارت منتقل شده به قطعه کار در طی فرایند جوشکاری قابل توجیه است. در واقع افزایش سرعت دوران و کاهش سرعت جابجایی ابزار باعث افزایش گرمای تولیدی و انتقالی به اطراف می‌شود. به عنوان مثال، سرعت جابه‌جایی شرایط جوشکاری W.C.2 بزرگتر از سرعت جابه‌جایی در شرایط جوشکاری W.C.1 با همان سرعت دوران است و لذا دانه‌های ناحیه متأثر از گرما در نمونه W.C.2 کوچکتر است. از طرفی نمونه W.C.1 نسبت به نمونه W.C.3 در سرعت دوران کمتری جوشکاری شده است و در نتیجه متوسط اندازه دانه به علت تحمل حرارت کمتر تغییرات کمتری نیز متحمل شده است.

نکته جالب توجه، افزایش محسوس اندازه دانه در ناحیه متاثر از گرما در نمونه‌هایی است که مجدد تحت عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (W.C.4) قرار گرفته‌اند. بطوری‌که رشد دانه در این نمونه تقریبا مشابه نمونه جوشکاری شده در سرعت دوران بالا (W.C.3) بوده است. این امر نشان می دهد که اگرچه افزایش تعداد پاس می‌تواند منجر به ریزدانه‌سازی بیشتر در ناحیه اغتشاشی شود، ولی تولید گرمای مجدد و انتقال آن به نواحی اطراف جوش می تواند بر رشد دانه اثر مضاعف گذاشته و اندازه دانه را در این ناحیه افزایش دهد. تاثیر فزاینده تعداد پاس بر رشد دانه در ناحیه متاثر از گرما می‌تواند به‌علت رسانایی حرارتی بالا در مس نیز باشد.

3-2- سختی ویکرز

مقادیر سختی ویکرز در مناطق مختلف جوشکاری برای همه شرایط جوشکاری در شکل (5) ارایه شده است. نمودار این شکل نشان می‌دهد که سختی ناحیه اغتشاشی در تمام شرایط جوشکاری نسبت به ماده پایه افزایش یافته است. این به‌دلیل تاثیر ریزدانه سازی بر سختی می‌باشد. طبق رابطه Hall-Petch با افزایش ریزدانه سازی استحکام و در نتیجه سختی افزایش پیدا می‌کند [18-17].

$$\sigma y = \sigma 0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \qquad (۱)$$

در این رابطه σ_y استحکام تسلیم و σ_0، k و d به‌ترتیب استحکام تسلیم در اندازه دانه بی‌نهایت، ثابت ماده و قطر متوسط دانه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.5.6]

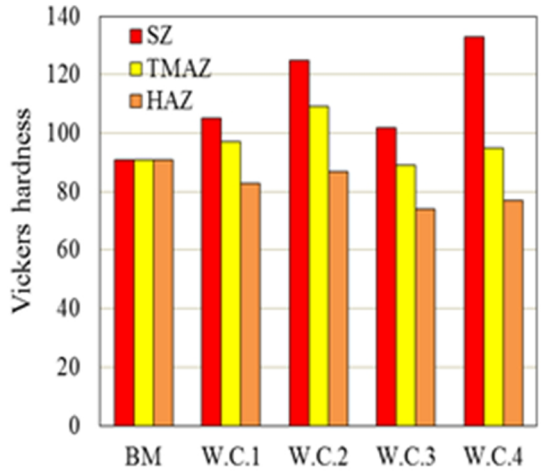
می‌باشند. کاهش اندازه دانه و در نتیجه افزایش سختی در شرایط جوشکاری W.C.4 که دو مرتبه تحت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفتند بیشتر محسوس است.

از طرف دیگر، سختی ناحیه متأثر از گرما نسبت به ماده پایه در تمام شرایط جوشکاری کاهش یافته است، که به دلیل وقوع پدیده آنیل و رشد دانه در این ناحیه است. این نمودار نشان می‌دهد که حداقل سختی مربوط به ناحیه متأثر از گرما در نمونه W.C.3 است. در این نمونه سرعت دوران ابزار 900 دور در دقیقه است که منجر به تولید و انتقال گرمای بیشتر و در نتیجه وقوع بیشترین شرایط آنیل و رشد دانه شده است. لذا در این شرایط، طبق رابطه Hall-Petch، کمترین میزان سختی با داده‌های ریزساختاری ارایه شده در جدول (3) انطباق دارد.

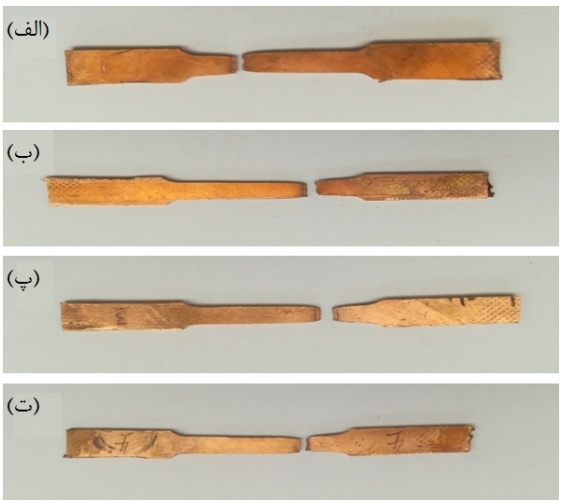
3-3- خواص کششی

شکل (6) نمونه‌های شکسته شده پس از آزمون کشش را نشان می‌دهد. همان‌طور که انطباق این تصاویر با تصاویر شکل (2) می‌توان فهمید که در همه نمونه‌ها محل شکست در ناحیه متأثر از گرما می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که ناحیه متأثر از گرما ضعیف‌ترین منطقه جوش است. همان‌طور که در توضیحات شکل (5) نیز تشریح شد ناحیه متأثر از گرما کمترین سختی را در بین مناطق مختلف در تمام شرایط جوشکاری نیز دارد.

شکل (7) نمودار تنش کرنش نمونه‌های جوشکاری شده و پایه را با استفاده از نمونه‌های دمبل شکل نشان می‌دهد. خصوصیات کششی جوش‌ها از جمله استحکام تسلیم، استحکام کششی و ازدیاد طول شکست نیز در جدول (4) ارایه شده است. داده‌های این جدول نشان می‌دهند که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سبب کاهش تنش تسلیم و استحکام کششی نسبت به فلز پایه شده و ازدیاد طول شکست افزایش می‌یابد. جدول (4) نشان می‌دهد که تنش تسلیم و استحکام کششی می‌توانند تا 22/6- و 29/2- درصد به‌ترتیب در نمونه‌های W.C.4 و W.C.3 نسبت به فلز پایه کاهش یابند. از طرف دیگر، در همه شرایط جوشکاری، افزایش طول شکست نسبت به فلزپایه افزایش می‌یابد. این موارد تایید می‌کند که پدیده آنیل و رشد دانه در ناحیه متأثر از گرما اتفاق افتاده و سبب افزایش طول شکست می‌شود.



شکل 5- سختی ویکرز در مناطق مختلف جوشکاری با شرایط مختلف.



شکل 6- نمونه‌های دمبل شکل پس از آزمایش کشش، (الف) تا (ت) به‌ترتیب مربوط به شرایط جوشکاری W.C.1، W.C.2، W.C.3 و W.C.4.

3-4- رفتار خوردگی

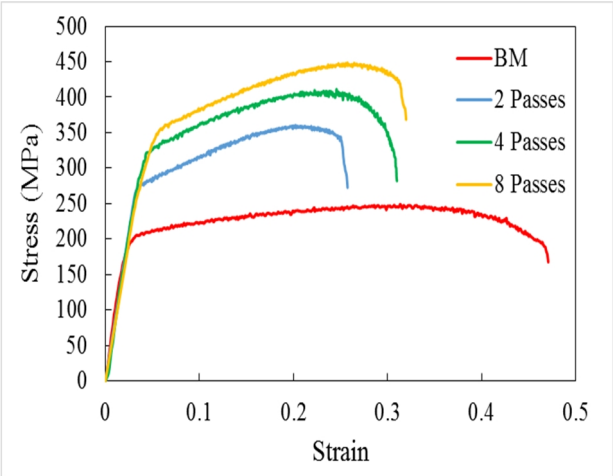
در بررسی رفتار خوردگی نمونه‌ها از طریق منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، دو پارامتر پتانسیل و چگالی جریان خوردگی بسیار مهم هستند. پتانسیل خوردگی را می‌توان نیروی مورد نیاز برای شروع واکنش خوردگی دانست. بنابراین، پتانسیل خوردگی مثبت به این معنی است که برای شروع فرایند

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.5.6]

جدول 4- تنش تسلیم، استحکام کششی و ازدیاد طول شکست شرایط مختلف جوشکاری و فلز پایه

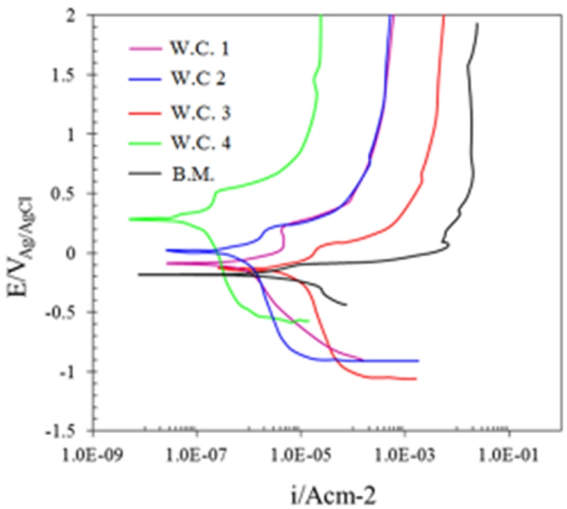
شرایط جوشکاری	تنش تسلیم (MPa)	تغییرات نسبت به ماده پایه (٪)	استحکام نهایی (MPa)	تغییرات نسبت به ماده پایه (٪)	افزایش طول شکست	تغییرات نسبت به ماده پایه (٪)
W.C.1	۱۳۸	-۵/۸	۲۹۸	-۱۵/۳	۰/۲۷	۲۲/۷
W.C.2	۱۴۶	-۲/۱	۳۴۶	-۱/۷	۰/۲۶	۱۸/۲
W.C.3	۱۱۷	-۲۲/۶	۲۴۹	-۲۹/۲	۰/۳۲	۴۵/۴
W.C.4	۱۳۱	-۱۶/۸	۲۸۱	-۲۰/۲	۰/۲۹	۳۱/۸
ماده پایه	۱۵۱	-	۳۵۲	-	۰/۲۲	-

خوردگی به نیروی بیشتری نیاز است. از طرف دیگر، چگالی جریان خوردگی مقدار بار رد و بدل شده در واکنش خوردگی است، بنابراین، هرچه مقدار این پارامتر کوچکتر باشد، مقاومت به خوردگی یک نمونه در نظر گرفته شده بیشتر است. شکل (8) منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی را برای نمونه‌های جوشکاری شده با شرایط جوشکاری مختلف، در ناحیه اغتشاشی نشان می‌دهد.



شکل 7- نمودار تنش-کرنش نمونه‌های جوشکاری شده با شرایط جوشکاری مختلف به‌همراه ماده پایه.

شکل (8) نشان می‌دهد که در نتیجه تغییر در سرعت جابه‌جایی و دورانی، رفتار خوردگی نمونه به سمت ایجاد و تقویت لایه روئین سطحی تغییر کرده و با افزایش سرعت جابجایی و کاهش سرعت دوران ابزار جوش، شاهد کاهش چگالی جریان و مثبت‌تر شدن پتانسیل خوردگی می‌شود. مطالعات مختلف و روش‌های مختلف از جمله اتصال نوردی انباشتی و اکستروژن در کانال مساوی زاویه دار نیز برای بررسی تأثیر اندازه دانه در فلزات و آلیـــاژهای مختلـف بر رفتار خوردگی آن‌ها انجام شده است. در این رابطه، نیک فهم و همکاران اثر اندازه دانه بر رفتار خوردگی مس خالص را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش تعداد دانه‌های جوشکاری و ریزتر شدن دانه‌ها، مقاومت در برابر خوردگی مس خالص بهبود می‌یابد [21-19].



شکل 8- منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی نمونه‌های جوشکاری شده با شرایط جوشکاری مختلف به‌همراه ماده پایه.

با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری، رفتار خوردگی نمونه نیز تغییر کرده و نسبت به نمونه‌های تک پاس به سمت چگالی جریان پایین‌تر و پتانسیل مثبت‌تر منتقل می‌شود. همان‌طور که قبلا اشاره شد با افزایش تعداد پاس، کاهش سرعت جابجایی و کاهش سرعت دوران ابزار جوشکاری، اندازه دانه کاهش می‌یابد و در نتیجه چگالی لایه روئین افزایش می‌یابد. لایه روئین غالبا از تشکیل محصولات خوردگی روی سطح ایجاد شده و می تواند به‌عنوان سدی در برابر خوردگی سطح باشد و در نتیجه به شدت باعث کند شدن سرعت خوردگی می‌شود. ازطرفی به‌نظر می‌رسد دانه‌های ریزتر با تشکیل لایه رویین

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.5.6]

ضخیم‌تر و فشرده‌تر تاثیر بیشتری بر افزایش مقاومت در برابر خوردگی مس دارند. تاثیر تشکیل لایه روئین بر شدت خوردگی را می‌توان در کاهش شدت جریان شاخه آندی در نمودار پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی مشاهده کرد. به‌طوری‌که با ریز شدن اندازه دانه‌ها و در نتیجه افزایش ضخامت و فشردگی لایه روئین روی سطح مس خالص، شدت جریان آندی کاهش پیدا کرده است. این امر نشان می‌دهد که لایه‌های روئین تشکیل شده در سطوح با دانه بندی ریزتر از حمله یون‌های مخرب کلر به‌طور موثرتری جلوگیری کرده و مقاومت در برابر خوردگی سطح را بهبود می‌بخشد.

4- نتیجه‌گیری

خواص مکانیکی و رفتار خوردگی ورق‌های مسی جوشکاری شده با روش اغتشاشی اصطکاکی با شرایط جوشکاری مختلف در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج ذیل را می‌توان به عنوان دستاوردهای این تحقیق بیان کرد.

- وقوع پدیده تبلور مجدد در ناحیه اغتشاشی باعث می‌شود خصوصیات ریزساختاری و مکانیکی این منطقه به‌طور قابل توجهی بهبود یابند. این امر به دلیل ریزدانه‌سازی ساختار در نتیجه تحمل تغییر شکل پلاستیک شدید است. این تحقیق نشان داد که در نتیجه انجام فرایند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی، اندازه دانه‌ها می‌توانند تا 85/7% کاهش یابد.

- در همه شرایط جوشکاری، ناحیه متأثر از گرما ضعیف‌ترین منطقه جوش است. سختی این ناحیه می‌تواند تا 18/2% نسبت به فلزپایه کاهش یابد. علاوه بر این، استحکام کششی آن می‌تواند تا 29/2% نسبت به ماده پایه تنزل پیدا کند. بنابراین، برای داشتن جوش‌های مطلوب، باید ریزساختار و خواص مکانیکی این منطقه کمترین تغییر را داشته باشد و طول آن نیز کاهش یابد.

- اگرچه با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری باعث ریزدانه سازی بیشتر در ناحیه اغتشاشی می‌شود ولی اندازه دانه‌های ناحیه متأثر از گرما بیشتر رشد کرده و خصوصیات آن بیشتر تنزل یابند. بنابراین، افزایش تعداد پاس در این روش جوشکاری توصیه نمی‌شود و تا حد ممکن باید دمای فرایند را کاهش داد.

- با انجام فرایند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی، اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی به‌شدت کاهش می‌یابد. این امر سبب تشکیل لایه رویین سطحی با چگالی و فشردگی بیشتر شده تا با مکانیزم جلوگیری از حمله یون‌های مخرب کلر شدت خوردگی را به‌طور موثرتری کاهش دهد.

منابع

[1] H.J. Zhang, H.J. Liu, L. Yu, Effect of Water Cooling on the Performances of Friction Stir Welding Heat-Affected Zone, Journal of Materials Engineering and Performance, 21 (2012) 1182-1187.

[2] R. Pourhamid, A. Shirazi, Numerical simulation and experimental measurement of the thermal history of friction stir welded copper plates, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, (2020) 0954406220959362.

[3] R. Wang, H.-T. Kang, X. Lei, Fatigue Performance and Strength Assessment of AA2024 Alloy Friction Stir Lap Welds, Journal of Materials Engineering and Performance, (2020)

[4] T.F.A. Santos, T.F.C. Hermenegildo, C.R.M. Afonso, R.R. Marinho, M.T.P. Paes, A.J. Ramirez, Fracture toughness of ISO 3183 X80M (API 5L X80) steel friction stir welds, Engineering Fracture Mechanics, 77 (2010) 2937-2945.

[5] Y.E. Ma, Z. Zhao, B. Liu, W. Li, Mechanical properties and fatigue crack growth rates in friction stir welded nugget of 2198-T8 Al-Li alloy joints, Materials Science and Engineering: A, 569 (2013) 41-47.

[6] A. Forsstrom, S. Bossuyt, Y. Yagodzinskyy, K. Tsuzaki, H. Hanninen, Strain localization in copper canister FSW welds for spent nuclear fuel disposal, Journal of Nuclear Materials, 523 (2019) 347-359.

[7] P. Shi, Q. Wang, Y. Xu, W. Luo, Corrosion behavior of bulk nanocrystalline copper in ammonia solution, Materials Letters, 65 (2011) 857-859.

[8] Y.F. Sun, H. Fujii, Investigation of the welding parameter dependent microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure copper, Materials Science and Engineering: A, 527 (2010) 6879-6886.

[9] E. Lertora, Comparison of AA 2024 T3 friction stir welded and riveted overlap joints with the addition of a pressurization test, Materials & Design, 49 (2013) 259-266.

[10] A.A. Nia, A. Shirazi, Effects of different friction stir welding conditions on the microstructure and

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.5.6]

mechanical properties of copper plates, International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 23 (2016) 799-809.
[11] G. Li, L. Zhou, W. Zhou, X. Song, Y. Huang, Influence of dwell time on microstructure evolution and mechanical properties of dissimilar friction stir spot welded aluminum-copper metals, Journal of Materials Research and Technology, 8 (2019) 2613-2624.
[12] P. Nagabharam, D. Srikanth Rao, J. Manoj Kumar, N. Gopikrishna, Investigation of Mechanical Properties of Friction Stir Welded pure Copper Plates, Materials Today: Proceedings, 5 (2018) 1264-1270.
[13] A.A. Nia, H. Omidvar, S.H. Nourbakhsh, Effects of an overlapping multi-pass friction stir process and rapid cooling on the mechanical properties and microstructure of AZ31 magnesium alloy, Materials & Design, 58 (2014) 298-304.
[14] L.G. Vigh, I. Okura, Fatigue behaviour of Friction Stir Welded aluminium bridge deck segment, Materials & Design, 44 (2013) 119-127.
[15] A.T. Vijayashakthivel, T.N. Srikantha Dath, R. Krishnamurthy, Response of copper to Equal Channel Angular Pressing with different processing temperature, Procedia Engineering, 97 (2014)56-63.
[16] C.F. Zhu, F.P. Du, Q.Y. Jiao, X.M. Wang, A.Y. Chen, F. Liu, D. Pan, Microstructure and strength of pure Cu with large grains processed by equal channel angular pressing, Materials & Design (1980-2015), 52 (2013) 23-29.
[17] S. Mironov, Y.S. Sato, H. Kokawa, Development of grain structure during friction stir welding of pure titanium, Acta Mater 57 (2009) 4519-4528.
[18] F.J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, Elsevier Ltd, Amsterdam, 2004.
[19] J.A. Petit, G. Chatainier, F. Dabosi, Inhibitors for the corrosion of reactive metals: titanium, Zirconium and thire alloys in acid media, Corros. Sci. 21 (1981) 15e19.
[20] S. Hrapovic, B.L. Luan, M.D. Amours, G. Vatankhah, G. Jerkiewicz, Morphology, chemical composition, and electrochemical characteristics of colored titanium passive layers, Langnuir (2001) 3051e3060.
[21] A. Nikfahm, I. Danaee, A. Ashrafi, M.R. Toroghinejad, Effect of grain size changes on corrosion behavior of copper produced by accumulative roll bonding process, Materials Research, 16 (2013) 1379-1386.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.5.6]