نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره1، بهار و تابستان1399، صفحه 55-49

جوشکاری همزن اصطکاکی نمونه‌های برنجی تک فاز پس از نورد تجمعی

سجاد امامی، توحید سعید *

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند.

(دریافت مقاله: 1397/08/15 ؛ پذیرش مقاله: 1398/02/20)

چکیده

صفحات برنجی تک فاز به ضخامت 2 میلیمتر با روش نورد تجمعی با سیکل‌های متفاوت 1 و 3 تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفتند. خواص مکانیکی از قبیل سختی، استحکام تسلیم و کششی نمونه‌ها با افزایش تعداد پاس‌های نورد تجمعی بهبود پیدا کردند. به نحوی که سختی از 95 HV در نمونه‌های آنیلی تا 225 HV در نمونه حاصل از 3 مرحله نورد تجمعی افزایش یافت و همچنین استحکام تسلیم و کششی نمونه‌های حاصل از نورد تجمعی به ترتیب تا 5 و 2 برابر نمونه‌های آنیل شده افزایش یافتند. جوش بدون درزی بر روی نمونه آنیل شده و همچنین ورق‌های فرآوری شده از فرایند نورد تجمعی با روش جوشکاری همزن اصطکاکی با سرعت چرخشی 400 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 100 میلیمتر بر دقیقه ایجاد گردید. مشاهدات ریزساختاری نشان دادند که ریزساختار هم‌محور و ریز مشابهی بر اثر وقوع تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه همزده هر سه نمونه شکل یافته است. خواص مکانیکی نواحی اتصال با آزمون‌های سختی سنجی و کشش مطالعه گردید. نتایج حاصل از سختی سنجی نشان داد که مقادیر سختی در ناحیه جوش نمونه‌های نورد تجمعی به علت حرارت همراه با این فرآیند تا 110 HV کاهش یافته است. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان داد که استحکام تسلیم وکششی نمونه‌های تهیه شده از مقطع جوش نمونه‌های نورد تجمعی به ترتیب 1/8 و1/3 برابر نمونه‌های کششی تهیه شده از مقطع جوش نمونه‌های آنیل شده است.

کلمات کلیدی: تغییر شکل پلاستیک شدید، جوشکاری همزن اصطکاکی، برنج تک فاز، تبلور مجدد دینامیکی.

Friction stir welding of accumulative roll bonded single phase brass

S. Emami, T. Saeid*

Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

(Received 6 November 2018 ; Accepted 10 May 2019)

Abstract

Single phase brass strips with 2 mm thickness were severely deformed through 1 and 3 cycles of accumulative roll bonding process (ARB). ARB process effectively increased the hardness, yield strength, and the ultimate strength of the processed materials. The hardness of processed material increased from 95 HV in annealed material to 225 HV in 3 cycle ARBed material, and the yielding and ultimate strengths increased more than 5 and 2 times of the annealed sample, respectively. Friction stir welding (FSW) process was successfully conducted on the annealed and ARBed samples to investigate and compare the microstructure and the mechanical properties of the joints obtained in bead on plate configuration. Microstructural observations showed that very fine dynamically recrystallized grains developed in the stir zones (SZs) of all welded samples. Mechanical properties were evaluated by hardness and tensile testing. Hardness test for the ARBed and FS welded samples showed that the hardness value decreased by 110 Hv in the

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: Saeid@sut.ac.ir

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

resultant SZs. Results of tensile testing revealed that yield and ultimate strength of the FS welded ARBed samples 1.3 and 1.8 times are greater than that of the annealed FS welded sample.

Keywords: Severe plastic deformation, Friction stir welding, Single phase brass, Dynamic recrystallization.

1- مقدمه

سال‌هاست که موضوع اصلی در تحقیقات و صنایع فلزی، دستیابی به موادی با نسبت استحکام به وزن بالاتر است. اساس بیشتر این تحقیقات را رابطه هال- پچ در بر می‌گیرد، این رابطه بیان می‌نماید که استحکام ماده با ریشه دوم اندازه دانه رابطه عکس دارد یا به عبارتی طبق این رابطه با کاهش اندازه دانه استحکام فلز افزایش می‌یابد. با ریز شدن اندازه دانه کسر حجمی مرز دانه‌ها در واحد حجم پلی کریستال افزایش می‌یابند که خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی را در مقایسه با نوع درشت دانه خود بهبود می‌دهد [1-4]. یکی از پر کاربردترین و موثرترین روش‌ها برای تولید مواد فلزی فوق ریز دانه روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) می‌باشد که اساس این فرآیندها بر پایه سیلان فلز و شکستن دانه‌های درشت آن به دانه‌های ریزتر و نیز افزایش کارسختی به سبب افزایش و تجمع نابجایی‌ها می‌باشد. از این‌رو، مواد فوق ریزدانه استحکام و چقرمگی بالایی نسبت به مواد با ریزساختار درشت از خود نشان می‌دهند و به طور روزافزونی در ساخت سازه‌های سبک مورد استفاده قرار می‌گیرند [5]. از آن‌جا که در فرایندهای ساخت بحث اتصال مطرح است، اتصال مواد فوق ریزدانه از این قاعده مستثنی نبوده و توجه بسیاری از محققین را به خود معطوف ساخته است. اهمیت اتصال این دسته از مواد مهندسی بیشتر به علت ناپایداری حرارتی ریزساختاری است که چگالی بالای از عیوب بواسطه اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید به هنگام فراوری در در ریزساختار شکل گرفته است. این عیوب در دمای بالای اتصال به روش جوشکاری مرسوم ذوبی ناپایداری بیشتری از خود نشان داده و سرآغاز تحولات ریزساختاری در ناحیه اتصال در آن دمای بالا می‌شود [6و7]. در این راستا به کارگیری فرایندهای جوشکاری ذوبی به علت ذوب و انجماد مجددی که در ناحیه اتصال رخ می‌دهد، ریزساختار اصلاح شده به هنگام اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید را از بین می‌برد و ریزساختاری انجمادی به همراه عیوبی احتمالی در ناحیه اتصال توسعه می‌دهد [8و9]. فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی به عنوان یک روش اتصال در حالت جامد، به علت داشتن مزیتهایی مانند حرارت ورودی پایین و قابلیت آسان جوشکاری موادی مانند مس که جوشکاری آنها با روش‌های مرسوم ذوبی کار ساده‌ای نمی‌باشد، توجه بسیاری از محققین در زمینه‌ی اتصال مواد فوق ریزدانه به خود معطوف ساخته است. چرا که فرایند FSW با اصلاح ریزساختار اتصالاتی با خواص مکانیکی مطلوبی توسعه می‌دهد [10-12]. از این‌رو، ریزساختار و خواص مکانکی مقاطع جوش حاصل از فرایند FSW بر روی برنج تک‌فازی پس از نورد تجمعی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

2- مواد و روش انجام آزمایش

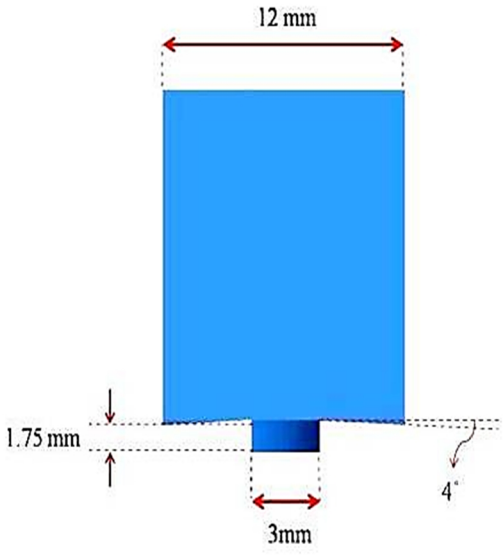
در تحقیق حاضر، ابتدا ورق‌هایی از جنس برنج تک فاز (Cu-%33/815Zn) در ابعاد $100\times20\times2mm^3$ برشکاری شدند و سپس برای از بین بردن سابقه عملیات مکانیکی و حرارتی تمامی نمونه‌ها در دمای 700°C و مدت زمان 60 دقیقه آنیل شدند. برای اتصال ورق‌های برنجی با روش نورد تجمعی ابتدا عملیات آماده سازی سطحی روی نمونه‌ها انجام شد که شامل چربی زدایی سطوح اتصال سپس برس کاری سطوح چربی زدایی شده می‌باشد. چربی زدایی نمونه‌ها با دستگاه ارتعاش التراسونیک در دمای اتاق به مدت 5 دقیقه در استون انجام گرفت. با اعمال فرایند نورد تجمعی دو نمونه با تعداد 1 و 3 پاس بدست آمدند. جدول (1) ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. نمونه‌های حاصل با ابزاری از جنس فولاد H13 با پروفیل استوانه‌ای ساده و ارتفاع

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

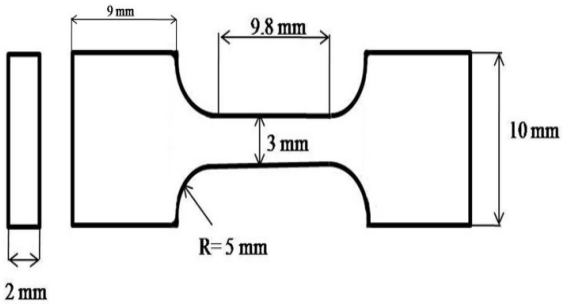
جدول 1- ترکیب شیمیایی برنج تک‌فاز

Cu	Zn	Sn	Pb	Fe	Ni	Ti, s	% دیگر عناصر
66/15	33/815	0/008	0/01	0/11	0/005	<0/002	<0/001

1/75 mm (شکل (1)) مورد جوشکاری با سرعت‌های چرخش 400 rpm در جهت ساعتگرد و سرعت خطی 100 mm/min قرار گرفتند. جهت انجام مطالعات ریزساختاری نمونه‌های مورد نظر به صورت عمود بر سطح مقطع جوش برش داده شدند و سپس بر روی آن‌ها عملیات سنباده‌زنی و پولیش انجام گرفت تا سطح مقطع جوش از نظر ریزساختاری مورد بررسی قرار گیرد. بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ نوری بعد از اچ انجام شد. محلول مورد استفاده برای اچ ترکیبی از $FeCl_3$، HCl و H_2O می‌باشد. برای ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌هایی از مقاطع عرضی جوش‌ها برای آزمون کشش مطابق با استاندارد JISZ2201 تهیه شدند



شکل1- طرح‌واره‌ای از ابزار مورد استفاده.



شکل 2- ابعاد نمونه‌های کشش.

ابعاد نمونه‌های کشش در شکل (2) ارائه شده است. آزمون سختی سنجی ویکرز با بار 50 گرم به مدت 10 ثانیه از سطح مقطع عمود بر جهت جوشکاری انجام شد.

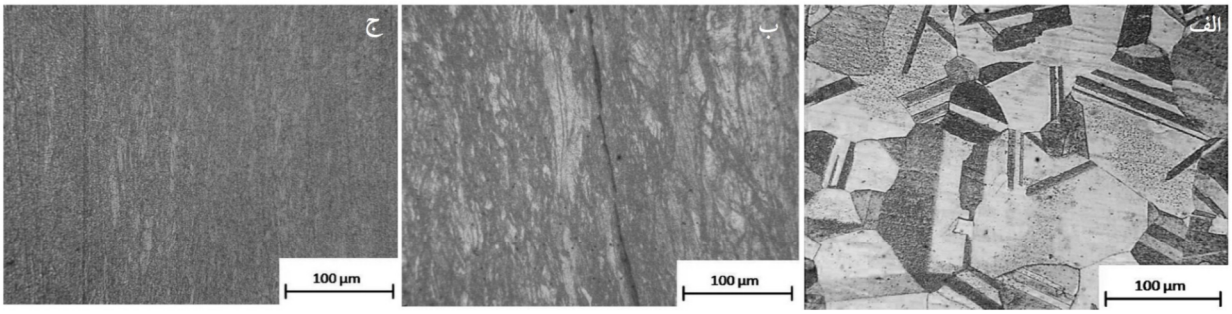
3- نتایج و بحث

شکل (3) ریزساختار فلز پایه آنیل شده و ریزساختار نمونه‌های نورد تجمعی شده در مقطع عمود بر جهت نورد را نشان می‌دهد. فرایند آنیل برای همگن کردن ریزساختار و حذف تنش‌های حاصل از فرایند تولید به نمونه‌ها اعمال گردید. شکل (3-الف) ریزساختار آنیل شده را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل ریزساختار از دانه‌های درشت با لایه‌های پهن و موازی تشکیل یافته است. این لایه‌های پهن در واقع دوقلویی‌های آنیلی هستند که در مرحله آنیل در حین بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه در موادی با انرژی نقص در چیدن پایین تا متوسط تشکیل می‌شوند [13].

شکل (3-ب و3-ج) تصاویر ریزساختاری از مقطع عمود بر جهت نورد (صفحه ND-TD) نمونه‌های نورد تجمعی شده را نشان می‌دهد. ساختار دانه‌ای کشیده در راستای عرضی نورد (TD) نشان دهنده ساختار پنکیکی دانه‌ها در این راستا می‌باشد [14].

کاملا آشکار است که فصل مشترک لایه‌ها با افزایش تعداد مراحل نورد باریکتر می‌شود. بعد از اعمال 3 مرحله نورد که تعداد لایه‌ها به 7 می‌رسد، اتصال بین لایه‌ها بهبود یافته است، به طوری‌که فصل مشترک بین لایه‌ها را به سختی می‌توان تشخیص داد [4و11]. همچنین از تصاویر ریزساختاری نمایان است که اندازه دانه در ریزساختارهای حاصل از نورد تجمعی با افزایش مراحل نورد کاهش می‌یابد [4]. کاهش شدید اندازه دانه در ریزساختار ماده پس از نورد تجمعی اساسا مربوط به تقسیم شدن دانه‌های اصلی در حین تغییر شکل پلاستیک شدید است [15-17].

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



شکل 3- الف) ریزساختار نوری حاصل از ورق برنجی آنیل شده در دمای K 973 به مدت h 1، ب) یک مرحله نورد تجمعی و ج) سه مرحله نورد تجمعی.

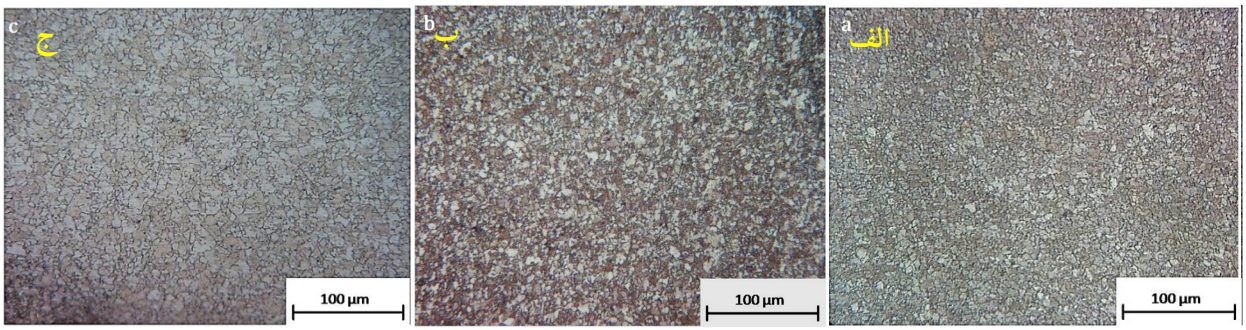


شکل 4- درشت ساختاری از ناحیه اتصال نمونه آنیل شده.

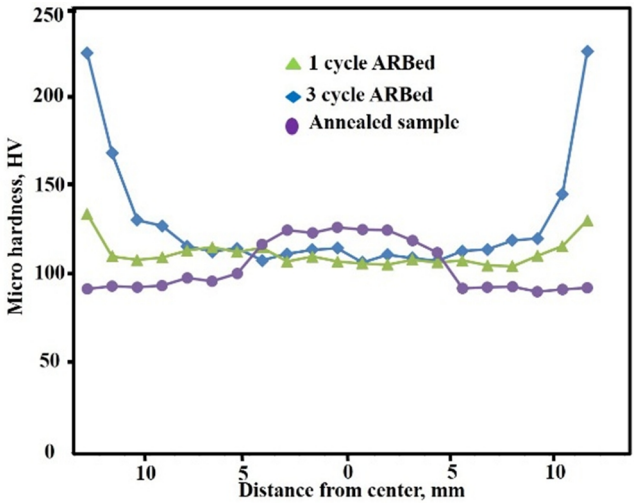
شکل(4) درشت ساختاری از مقطع عرضی جوش نمونه آنیل شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل دیده می‌شود که ریزساختار فلزپایه در اثر تغییر شکل پلاستیک شدیدی که توسط ابزار به ماده وارد می‌شود، در ناحیه همزده در هم شکسته می‌شود و سه ناحیه ریزساختاری متمایز همزده (SZ)، ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) و فلز پایه (BM) در ناحیه اتصال شکل می‌گیرد. در ناحیه TMAZ دانه‌های درشت و هم‌محور فلز پایه در امتداد کرنش اعمالی کشیده می‌شوند. کشیدگی دانه‌ها از مشخصه‌های بارز ناحیه TMAZ می‌باشد که به علت ناکافی بودن کرنش اعمالی دانه‌ها عمدتا تغییر شکل می‌یابند. همچنین دیده می‌شود که ریزساختار هم‌محور بسیار ظریفی در ناحیه همزده شکل یافته است. وجود چنین ریزساختار ظریف در ناحیه SZ و ساختار دانه‌ای کشیده فلز پایه در ناحیه TMAZ سبب شکل‌گیری مرز مشخصی بین آنها شده است [18و19].

شکل(5) ریزساختار ناحیه همزده نمونه‌های نورد تجمعی را نشان می‌دهد. کاملا آشکار است که فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی ریزساختارهای مشابهی را در ناحیه همزده توسعه داده است. این رفتار نشان می‌دهد که اندازه دانه اولیه نمونه‌های جوشکاری شده تاثیری در شکل‌گیری ریزساختار در حین FSW نداشته است. همچنین ریزساختار موادی که به صورت تبلور مجدد دینامیکی شکل می‌گیرند عمدتا تحت تاثیر دمای تغییر شکل و نرخ کرنش تغییر می‌یابد. از این‌رو، چون شرایط تغییر شکلی در هر سه نمونه مشابه بوده است، هر سه نمونه ریزساختارهای مشابهی را توسعه داده‌اند [13]. با وجود این، دیده می‌شود که اندازه دانه در ریزساختار شکل(5-ج) تا حدودی درشت‌تر از دیگر نمونه‌ها می‌باشد. این رفتار را می‌توان با درنظر گرفتن دمای تغییر شکل و میزان انرژی ذخیره شده در نمونه‌های نورد شده توجیه کرد. از آن‌جایی که میزان انرژی ذخیره شده به هنگام نورد تجمعی و دمای تغییر شکلی در حین FSW در نمونه با سه مرحله نورد بیشتر است، لذا انتظار می‌رود که رشد دانه در این نمونه با نرخ بیشتری رخ دهد.شکل(6) توزیع سختی در خط مرکزی جوش در سطح مقطع (ND-TD) را نشان می‌دهد. مطابق با شکل دیده می‌شود که سختی از 95 ویکرز در فلز پایه به 135 ویکرز در ناحیه همزده نمونه آنیل شده افزایش یافته است. این رفتار به علت تشکیل دانه‌های بسیار ریز تبلور مجدد یافته در ناحیه همزده نسبت به فلز پایه می‌باشد [8و20]. همچنین دیده می‌شود که

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



شکل 5- تصاویر ریزساختاری نواحی همزده: الف) نمونه آنیلی، ب) نمونه با یک مرحله نورد تجمعی و ج) نمونه با سه مرحله نورد تجمعی.

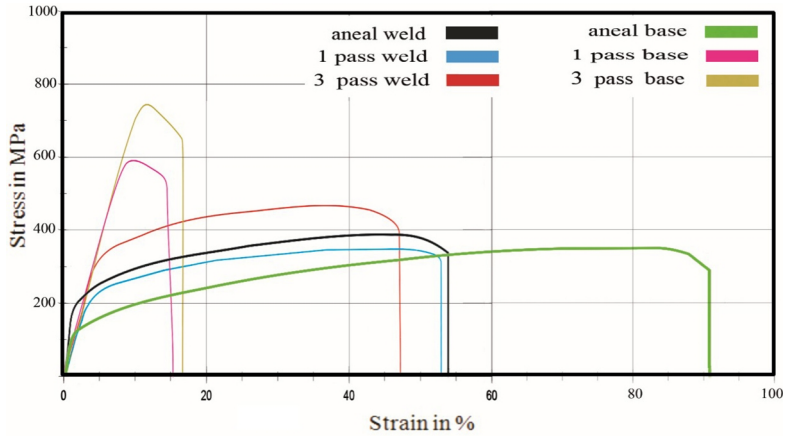


شکل 6- نمودار توزیع سختی در مقطع جوش نمونه‌های جوشکاری شده.

سختی در نمونه یک مرحله و سه مرحله نورد تجمعی به ترتیب تا 135 و 225 ویکرز افزایش می‌یابد. زمانی که یک ماده پلی کریستال تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد، چگالی مشخصی از نابجایی‌های متحرک نیاز است تا ماده بتواند خود را با کرنش اعمالی تطبیق دهد. بنابراین با تولید و انباشته شدن نابجایی‌ها در پشت مرزها شرایط برای عبور سامانه‌های لغزشی از مرز سخت‌تر می‌شود از طرفی با اعمال تغییر شکل شدید و کاهش اندازه دانه چگالی این موانع افزایش یافته است و در نتیجه سختی و استحکام ماده افزایش می‌یابد [13و14]. مطابق با توزیع سختی، میزان سختی در نمونه‌های نورد شده به علت ناپایداری حرارتی کاهش می‌یابد. با وقوع بازیابی دینامیکی در نتیجه تحرک و مهاجرت نابجایی‌ها میزان انرژی ذخیره شده در ماده کاهش می‌یابد. ساختارهای فرعی با شروع اعمال کرنش با برهمکنش نابجایی‌های ایجاد شده در آن دمای بالا صورت می‌گیرد، و نابجایی‌های غیرهم علامت همدیگر حذف می‌کند و نابجایی‌های هم علامت خود را دیواره از مرزهای فرعی با انرژی کم قرار می‌دهند. کاهش در چگالی نابجایی‌ها باعث کاهش سختی در ناحیه همزده می‌شود [13]. رفتار مشابهی در جوش‌های همزن اصطکاکی آلومینیوم به شدت تغییر شکل یافته نیز گزارش شده است [12]. نکته قابل توجه دیگر این است که میزان سختی در هر سه نمونه به صورت مشابه توزیع شده است. همچنین دیده می‌شود که سختی در نمونه‌های نورد شده در فاصله بیشتری از مرکز جوش کاهش یافته است. این رفتار به احتمال زیاد مربوط به ناپایداری حرارتی نمونه‌های نورد شده است که ماده در نزدیکی ناحیه همزده تحت تاثیر حرارت جوشکاری قرار گرفته و به صورت ایستایی ریزساختار دچار بازیابی و تبلور مجدد شده است.

شکل(7) منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. کاملا آشکار است فرایند نورد تجمعی استحکام تسلیم و کششی نمونه آنیلی را افزایش داده است. استحکام کششی از

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



شکل 7- نتایج حاصل از آزمون کشش.

360 MPa در نمونه آنیل شده به 580 MPa و 745 MPa به ترتیب در نمونه با یک مرحله و سه مرحله نورد تجمعی افزایش یافته است. چنین رفتاری در نمونه برنجی 70/30 پس از نورد تجمعی نیز گزارش شده است [4]. تنش سیلان با مجذور چگالی نابجایی‌ها رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین با افزایش تعداد مراحل نورد تجمعی، تغییر شکل بیشتری در فلز رخ داده و میزان بیشتری از عیوب در ریزساختار شکل می‌گیرند [13]. مطابق با منحنی‌های تنش-کرنش، نمونه آنیل شده به علت داشتن ریزساختاری با عیوب کمتر، درصد ازدیاد طول بیشتری در حین کشش از خود نشان داده است. در نمونه‌های نورد شده با افزایش کرنش میزان عیوب بیشتری در ریزساختار شکل گرفته است که باعث افزایش تنش سیلان و کارسختی در این نمونه‌ها شده است. نتایج همچنین نشان می‌دهند که با اعمال فرایند FSW تنش سیلان افزایش می‌یابد که می‌تواند مربوط به شکل‌گیری ریزساختار ظریف در ناحیه همزده باشد. اما در مورد نمونه‌های نورد شده فرایند FSW باعث کارنرمی شده و تنش سیلان نمونه‌های نورد تجمعی را کاهش داده است. اما با وجود این، استحکام تسلیم وکششی نمونه‌های تهیه شده از مقطع جوش نمونه‌های نورد تجمعی به ترتیب 1/8 و1/3 برابر نمونه‌های کششی تهیه شده از مقطع جوش نمونه‌های آنیل شده است. ریزساختار به شدت کار شده در حین نورد، با اعمال فرایند جوشکاری به علت ناپایداری حرارتی با فعال شدن فرایندهایی مانند بازیابی و تبلور مجدد، نرم شده و استحکام کاهش می‌یابد [21].

شکل (8) نواحی شکست نمونه‌های جوشکاری را نشان می‌دهند. مطابق با این شکل، شکست در نمونه آنیل شده از ناحیه فلز پایه و در نمونه‌های نورد شده از ناحیه همزده رخ داده است. این رفتار نشان می‌دهد که ریزساختار ناحیه همزده در نمونه آنیلی استحکام بیشتری نسبت به فلز پایه داشته است. این در حالی است که ریزساختار فلز پایه نمونه‌های نورد شده مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل نشان داده و شکست از ناحیه همزده رخ داده است. این رفتار در مقاطع جوش نمونه‌های آنیل شده و کار شده آلومینیوم نیز گزارش شده است [21].



شکل 8- تصاویر ماکرو از نمونه‌های کشش پس از جوشکاری با سرعت چرخشی 400 rpm و سرعت پیشروی 100 mm/min: الف) نمونه آنیل شده، ب) نمونه یک مرحله نورد تجمعی و ج) نمونه سه مرحله نورد تجمعی.

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

4- نتیجه گیری

با توجه به بررسی‌ها و مشاهدات موجود نتایج زیر قابل حصول می‌باشد:

1- با اعمال فرایند نورد تجمعی سختی و استحکام نمونه‌ها به دلیل اعمال کرنش افزایش می‌یابد.

2- با اعمال فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی بر روی نمونه‌های نورد تجمعی شده به دلیل انجام کار نرم در ناحیه همزده سختی و استحکام نسبت سختی و استحکام نمونه‌های نورد تجمعی شده کاهش می‌یابد.

3- اعمال فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی پس از فرایند نورد تجمعی بر نمونه‌های برنجی، باعث بهبود خواص ناحیه اتصال نسبت به نمونه‌های آنیلی جوشکاری شده می‌شود.

منابع

[1] Höppel, H.W., May, J., Göken, M., "Enhanced strength and ductility in ultrafine- grained aluminum produced by accumulative roll bonding", Advanced Engineering Materials, Vol. 6, pp. 781–784, 2004.

[2] Lee, S.H., Saito, Y., Tsuji, N., Utsunomiya, H., Sakai, T., "Role of shear strain in ultragrain refinement by accumulative roll-bonding (ARB) process", Scripta Materlia, Vol. 46, pp. 281–285, 2002.

[3] Tsuji, N., Saito, Y., Lee, S.H., Minamino, Y., "ARB (accumulative roll bonding) and other new techniques to produce balk ultrafine grained materials", Advanced Engineering Materials, Vol. 5, pp. 338-344, 2003.

[4] Pasebani S., Toroghinejad M.R., "Nano-grained 70/30 brass strip produced by accumulative roll-bonding (ARB) process", Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 491–497, 2010.

[5] Valiev R.Z., Zehetbauer M.J., Estrin Y., Höppel H.W., Ivanisenko Y., Hahn H., Wilde G., Roven H.J., Sauvage X., Langdon T.G., "The innovation of potential of bulk nanostructured materials", Advanced Engineering Materials. Vol. 9, pp. 527–533, 2007.

[6] Hosseini M., Danesh Manesh H., "Immersed friction stir welding of ultrafine grained accumulative roll-bonded Al alloy", Materials and Design, Vol. 31, pp. 4786–4791, 2010.

[7] Suna Y., Fujii H., Takadaa Y., Tsuji N., Nakata K., Nogi K., "Effect of initial grain size on the joint properties of friction stir welded aluminum", Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 317–321, 2009.

[8] Emami S., Saeid T., "Effects of Welding and rotational speeds on the Microstructure and Hardness of Friction Stir Welded Single-Phase Brass" Acta Metallurgica sinica, Vol. 28, pp. 766-771, 2015.

[9] Emami S., Saeid T., Azari Khosroshahi R., "Microstructural evolution of friction stir welded SAF 2205 duplex stainless steel", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 739, pp. 678-689, 2018.

[10] Sato Y.S., Kurihara Y., Park S.H.C., Kokawa H., Tsuji N., "Friction stir welding of ultrafine grained Al alloy 1100 produced by accumulative roll-bonding", Scripta Materila, Vol. 50, pp. 57–60, 2004.

[11] Topic I., Höppel H.W., Göken M., "Friction stir welding of accumulative roll-bonded commercial-purity aluminum AA1050 and aluminum alloy AA6016", Materials Science and Engineering A, Vol. 503, pp. 163–166, 2009.

[12] Sarkari Khorrami M., Kazeminezhad M., Kokabi A.H., "Microstructure evolutions after friction stir welding of severely deformed aluminum sheets", Materials and design, Vol. 40, pp. 364–372, 2012.

[13] Humphreys, F.J., Hatherly, M., *Recrystallization and related annealing phenomena*, 2nd edition, Elsevier, 2004.

[14] Songa R., Ponge D., Raabe D., Speer J.G., Matlock D.K., "Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels", Materials Science and Engineering A, Vol. 441, pp. 1–17, 2006.

[15] Kamikawa N., Sakai T., Tsuji N., "Effect of redundant shear strain on microstructure and texture evolution during accumulative roll-bonding in ultralow carbon IF steel", Acta Materalia, Vol. 55, pp. 5873–5888, 2007.

[16] S Chowdhury.G., Srivastava V.C., Ravikumar B., Soren S., "Evolution of texture during accumulative roll bonding (ARB) and its comparison with normal cold rolled aluminium–manganese alloy" Scripta Materelia, Vol. 54, pp. 1691–1696, 2006.

[17] Kim H.W., Kang S.B., Tsuji N., Minamino Y., "Deformation Textures of AA8011 Aluminum Alloy Sheets Severely Deformed by Accumulative Roll Bonding", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 36, pp. 3051-3163, 2005.

[18] Markushev M. V., "On the Principles of the Deformation Methods of Grain Refinement in Aluminum Alloys to Ultrafine Size: II. Ultrafine-Grained Alloys", The Physics of Metals and Metallography, Vol. 108, pp. 161–170, 2009.

[19] Lowe T.C., Valiev R.Z., "The Use of Severe Plastic Deformation Techniques in Grain Refinement", JOM Vol. 56, pp. 64-68, 2004.

[20] Park H.S., Kimura T., Murakami T., Nagano Y., Nakata K., Ushio M., "Microstructures and mechanical properties of friction stir welds of 60% Cu–40% Zn copper alloy", Materials Science and Engineering A, Vol. 371, pp. 160–169, 2004.

[21] Sarkari Khorrami M., Kazeminezhad M., Kokabi A.H., "Mechanical properties of severely plastic deformed aluminum sheets joined by friction stir welding", Materials Science and Engineering A, Vol. 543, pp. 243– 248, 2012.

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