نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 2، پاییز و زمستان1397، صفحه 34-23

اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر کیفیت اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

امین ربیعی زاده[1]، احمد افسری[2]*

۱- استادیار، مهندسی متالورژی، گروه مهندسی مواد ، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک ، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۴)

چکیده

در تحقیق حاضر اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم ۵۷۵۴ به ۶۰۶۳ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با / بدون افزودن نانو لوله کربنی مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. نمونه‌های جوشکاری شده ابتدا توسط آزمون‌های غیر مخرب نظیر بازرسی چشمی، امواج فراصوتی و پرتونگاری بررسی شد و عدم وجود عیوب در ناحیه اتصال مورد تایید قرار گرفت. نتایج سختی سنجی حاکی از آن است که ساختار جوشکاری شده با حضور نانو لوله‌های کربنی در ناحیه اغتشاش دارای سختی بالاتری است. به منظور توزیع بهتر نانو لوله‌های کربنی در ناحیه اغتشاشی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در ۲ پاس انجام شد و مشاهده شد که بعد از پاس دوم پروفیل سختی در ناحیه اتصال یکنواخت تر شده است و استحکام کششی نسبت به حالت یک پاس، افزایش ۲۵ درصدی نشان می‌دهد. همچنین مقدار ضریب اصطکاکی در نمونه دو پاس جوشکاری شده، در حدود ۳۰ درصد از مقدار ضریب اصطکاک فلز پایه کمتر است. با توجه به وابستگی مقاومت سایشی به مقدار سختی و ضریب اصطکاک، می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت سایشی نیز در نانوماده مرکب سطحی تولید شده در ناحیه اغتشاش افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: جوشکاری غیرهمجنس، آلیاژ آلومینیم، نانولوله کربنی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آزمون سایش.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: rabieezadeh@iaushiraz.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

Effect of carbon nanotubes addition on dissimilar joining of aluminium alloys by friction stir welding

A.Rabiezadeh[1*], A. Afsari[2]
1- Department of Materials Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

(Received 23 April 2018 ; Accepted 5 September 2018)

Abstract
The purpose of this study was to examine the effect of adding carbon nanotubes during Friction Stir Welding (FSW) on dissimilar Al alloy joints. More specifically, both FSW and Friction Stir Processing (FSP) were performed simultaneously to investigate the effect of adding carbon nanotubes on mechanical properties and microstructure of the weld zone for joining AA5754-H22 and AA6063-T4aluminum alloys. Reliability of the joints was tested by non-destructive tests such as visual inspection, ultrasonic, and radiography. The global mechanical behaviors of dissimilar welds were similar to that of the base material. Important losses in ductility were also reported for dissimilar welds. Microstructural evaluation of fractured surfaces indicated that ductile fracture was the major mechanism of similar and dissimilar welds. We expected that the locks for dislocation moving would improve the mechanical properties of the weld zone. Also, the friction coefficient in the two-passes welded sample wasabout 30% lower than the friction coefficient of the base metal. On the bases of the wear resistance of hardness and the coefficient of friction, it was concluded that the wear resistance of the surface Nano-composite produced had also increased in the stir zone.

Keywords: Dissimilar welding, Al alloy, Carbon nanotube, Friction stir welding, Wear test.

1- مقدمه

آلومینیم به دلیل فراوانی، استحکام بالا، دانسیته پایین، انعطاف‌پذیری‌خوب، مقاومت‌به خوردگی بالا، هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت پذیرش مکانیزم‌های استحکام بخشی و شکل پذیری سرد و گرم و تنوع آلیاژی، پرکاربردترین فلز غیرآهنی در صنعت می‌باشد [۱]. اما مقاومت سایشی نسبتا ضعیف آلومینیم و آلیاژهایش منجر به محدودیت استفاده از آن‌ها در کاربردهای تریبولوژیکی شده است [۲]. یکی از راه‌های بهبود خواص سایشی آلیاژهای آلومینیم، افزودن ذرات فاز دوم و تولید ماده مرکب است. بر این اساس، تولید کامپوزیت‌های سطحی برپایه آلیاژهای آلومینیم به صورت گسترده‌ای به روش‌های مختلفی صورت گرفته است که یکی از پرکاربردترین این روش‌ها، فرآوری اصطکاکی اغتشاشی است [۳-۶].جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی فرایندی نوین در اتصال فلزات مختلف در حالت جامد است. در این روش، اتصال به وسیله حرکت و چرخش همزمان ابزار جوشکاری بر روی خط جوش برقرار می شود.

شکل(۱-الف) شماتیک این روش را نشان می‌دهد. ابزار به طور معمول قطعه‌ای استوانه‌ای شکل است که در انتها و مرکز آن پین یا پروبی تعبیه می‌شود. این روش به دلیل عدم نیاز به ذوب فلزات، راندمان بالا، عدم آلایندگی زیست محیطی و کاربرد برای آلیاژهایی که به روش‌های مرسوم قابل جوشکاری نیستند، جایگـزین مناسبی برای روش‌های جوشکاری ذوبی می‌باشد که در صنعت کارایی بالایی پیدا کرده است [۷-۱۰].

همراه با پیشرفت این روش جوشکاری در سال‌های اخیر، یک فرایند نوین اصلاح مواد تحت عنوان فرایند اصطکاکی- اغتشاشی ابداع و توسعه یافته است (شکل۱-ب). در این فرایند به عوض جوش خوردن دو قطعه به همدیگر، ابزار در یک قطعه مستقل نفوذ نموده و در حین پیشروی روی قطعه کار منجر به اصلاحات میکروساختاری موضعی در ماده می‌گردد [۳و۵]. تاکنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی آلیاژهای آلومینیم، مس، منیزیم، تیتانیم و فولادها توسط محققین انجام شده است [۱۱-۲۲]. در این بررسی‌ها اتصـال همجنـس و غیرهمجنس این آلیـاژها مـورد

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول۱-خلاصه ای از بررسی‌های به عمل آمده در خصوص افزودن نانوذرات به ناحیه اتصال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

آلیاژ آلومینیم	نانو ذره	سال	ملاحظات	مرجع
AA7075	کاربید سیلیسیم	2014	بهبود استحکام کششی و داکتیلیتی	[۳۲]
AA6061	آلومینا	2015	افت سختی به دلیل انحلال رسوبات و بهبود مقاومت به سایش	[۳۳]
AA5083 – AA7075	آلومینا	2015	بهبود مقاومت به خوردگی و بهبود استحکام ضربه‌ای	[۳۴]
AA7075	کاربید بور	2015	بهبود مقاومت به حفره دار شدن و افت سختی	[۳۵]
AA7075	کاربید سیلیسیم	2015	به دلیل کاهش تنش پسماند، داکتیلیتی ناحیه جوش بهبود می‌یابد	[۳۶]
AA7075-AA5083	آلومینا	2015	کاهش اندازه دانه و بهبود مقاومت به سایش و خوردگی	[۳۷]
AA5052 – AA6063	مس	2016	کنترل اندازه دانه و بهبود خواص مکانیکی	[۳۸]
AA5052	کاربید سیلیسیم	2016	کاهش اندازه دانه و تنش شکست پایین در نتیجه تجمع ذرات	[۳۹]

بررسی قرار گرفته است. از جمله مواردی که تاکنون بررسی چندانی در خصوص آن به عمل نیامده است، استفاده از ذرات تقویت کننده به منظور بهبود خواص مکانیکی و سایشی ناحیه اتصال به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. پژوهش‌های به عمل آمده در خصوص اضافه نمودن نانوذرات در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیم به صورت خلاصه در جدول(۱) آمده است.با بررسی جدول(۱) مشاهده می‌شود پژوهش‌های کمی در خصوص افزودن نانوذرات تقویت کننده به ناحیه اتصال در حین فرایند جوشکاری آلیاژهای آلومینیم تا کنون انجام شده است. علاوه بر این عمدتا از نانوذرات سرامیکی به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شده است.

آلیاژهای آلومینیم سری 6XXX از جمله آلیاژهای رسوب سخت شونده هستند که در نتیجه حرارت وارده در اثر جوشکاری/فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، رسوبات در ناحیه اغتشاش حل شده و منجر به کاهش استحکام در این ناحیه می‌شود [۲۳-۲۵]. از این رو در اتصال‌های همجنس و غیرهمجنس این آلیاژها افت استحکام و سختی منجر به شکست این قطعات در تنش‌هایی کمتر از استحکام کششی آلیاژهای سری 6XXX می‌شود. به منظور جبران این افت استحکام و سختی می‌توان با وارد نمودن ذرات تقویت کننده به ناحیه اغتشاش و ایجاد ماده مرکب، خواص مکانیکی این سری آلیاژها را بهبود داد. در این پژوهش بـرای اولـین بـار به منظـور دستیابی به خواص مکانیکی و سایشی بهتر در ناحیه اتصال غیر همجنس آلیاژهای۵۷۵۴ و ۶۰۶۳، دو فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و فرآوری اصطکاکی اغتشاشی با یکدیگر ادغام و نانولوله‌های کربنی به عنوان ماده تقویت کننده در حین فرایند جوشکاری در ناحیه اغتشاش این دو آلیاژ پراکنده شده است. بررسی‌های متالوگرافی، استحکام کششی، سختی سنجی و آزمون سایش به منظور ارزیابی خواص قطعات بعد از انجام اتصال به عمل آمد.

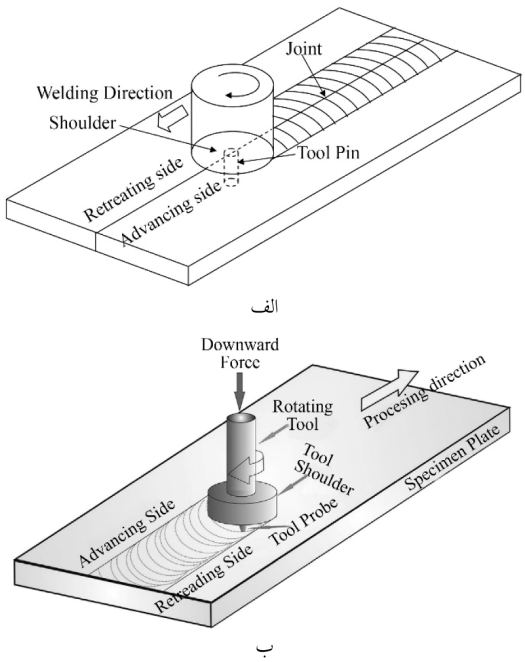
2- مواد و روش تحقیق

جوشکاری بر روی قطعاتی از جنس آلیاژ آلومینیمAA5754-H22 وAA6063-T4انجام‌شد.آنالیز کوانتومتری، کشش‌و سختی‌سنجی به منظور تعیین جنس نمونه‌ها انجام شد که با مقایسه با استانداردها موید جنس آلیاژها و عملیات حرارتی آن‌ها است.

نمونه‌ها از ورقی با ضخامت۶ میلی‌متر در ابعاد ۶۰ در ۱۲۰ میلی‌متر تهیه شد. به منظور جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، نمونه‌ها به صورت لب به لب در قالبی با ابعاد ۱۲۰ در ۱۲۰میلی‌متر قرار داده شدند. جوشکاری در جهت عمود بر جهت نورد نمونه‌ها با سرعت پیشروی ۴ میلیمتر بر دقیقه و سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و زاویه انحراف ابزار ۳ درجه انجام شد. به منظور ساخت ابزار جهت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از فولاد گرمکارH13 که با سختی ۲±۵۲ راکول سی، استفاده شد. این ابزار، رزوه‌دار و دارای شانه‌ای با

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

قطر خارجی ۱۸ میلیمتر و دارای پین به حالت مخروط ناقص (طول پین ۵/۶ میلیمتر، قطر کوچک و بزرگ آن به ترتیب ۳ و ۶ میلیمتر)، طراحی و ساخته شده است(شکل ۲).در جوشکاری غیرهمجنس به روش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژی را در سمت پیشرو قرار می‌دهیم که خواص بهتری بعد از فرآیند داشته باشد یا به عبارت دیگر در نتیجه فرآیند جوشکاری به ریزساختار بهتر یا خواص مکانیکی بالاتری برسد [۲۶]. بر این اساس باید آلیاژی که از نظر خواص مکانیکی ضعیف‌تر است، در سمت پیشرو قرار گیرد و در پژوهش حاضر آلیاژ ۶۰۶۳ در سمت پیشرو و آلیاژ ۵۷۵۴ در سمت پسرو قرار داده شد.



شکل۱- الف) شماتیک روش جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی [۹]؛ ب)شماتیک فرآوری اصطکاکی اغتشاشی [۵]



شکل۲- ابزار طراحی شده جهت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

به منظور بررسی اثر نانوذرات بر خواص ناحیه اتصال از نانو لوله کربن با قطر خارجی ۱۰ نانومتر استفاده شده است. برای وارد کردن نانو لوله‌ها به ساختار ناحیه جوش، شیاری به عمق ۳ و عرض ۰/۲ میلیمتر روی لبه ورق‌ها ایجاد گردید که قبل از انجام فرایند جوشکاری با استفاده از نانو لوله‌های کربنی پر شد. با توجه به امکان تجمع نانولوله‌های کربنی و به منظور توزیع بهتر نانولوله‌ها در ریزساختار، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در دو پاس انجام شد.

جهت بررسی کیفیت سطح و محل جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی آزمون‌های غیر مخرب بازرسی چشمی، بازرسی فراصوت و رادیوگرافی گاما بر روی نمونه‌ها انجام شد. نمونه‌ها توسط دستگاه تست آلتراسونیک مدلUSM35 مورد بازرسی فراصوتی قرار گرفت. در انجام این آزمون از پراب نرمال فرستنده/گیرنده (T/R Probe) با فرکانس MHz ۲ استفاده شد. استفاده از پراب با فرکانس MHz ۲ به علت شرایط دانه‌بندی منطقه جوش است و لذا استفاده از پراب با فرکانس کمتر جهت بررسی عیوب بهتر تشخیص داده شد.

جهت تعیین پروفیل سختی در امتداد سطح مقطع عرضی نمونه‌ها از روش ریزسختی سنجی ویکرز استفاده گردید. این آزمون توسط دستگاه مدل DHV-100 انجام شد.

ریزسختی سنجی با نیروی ۹/۸ نیوتن و در مدت زمان ۱۵ ثانیه مطابق با استاندارد ASTM E92 انجام شد.

به منظور بررسی‌های ریزساختاری آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ انجام شد.حکاکی نمونه‌های متالوگرافی توسط محلول پولانت (۱میلی‌لیتر HF، ۱۲ میلی‌لیتر HCl، ۶ میلی‌لیتر HNO_3 و ۱ میلی‌لیتر آب) به مدت ۱۰ ثانیه انجام شد تا ریزساختار توسط میکروسکپ نوری و میکروسکپ الکترونی روبشی مدل VEGA/TESCan مورد بررسی قرار گیرد. آزمون استحکام کششی با استفاده از دستگاه کشش universal مطابق با استاندارد ASTM E8-M انجام شد. سرعت فک دستگاه در این آزمون mm/min ۲ انتخاب گردید.

به‌منظور سنجش مقاومت به سایش و تعیین ضریب اصطکاک نمونه‌ها، روش پین روی دیسک بکار گرفته شده است؛

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

بدین‌صورت که ابتدا یک پین استوانه‌ای‌شکل به قطر ۵ میلی‌متر و به ضخامت قطعه‌کار با استفاده از ماشین برش سیمی با تخلیه الکتریکی از ناحیه فرآوری‌شده نمونه‌ها جدا گردید. در گام بعد سطوح مورد نظر از پین‌های تهیه‌شده تحت عملیات سنباده‌زنی و پرداخت‌کاری قرار گرفت. هریک از پین‌ها، با استفاده از محلول استون و در دستگاه پاک‌کننده فراصوت تمیزکاری و پس از آن با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شد. به منظور مقایسه نتایج با فلز پایه، یک پین با اندازه مذکور و شرایط یکسان نیز از فلز پایه تهیه شد.شرایط و متغیرهای لازم برای آزمون سایش بر اساس استاندارد ASTM G99-05 درنظرگرفته شده است. این شرایط عبارت از نیروی N ۱۰ ، سرعت m/s^{-1} ۰/۵، مسافت لغزش ۲۰۰m و شعاع مسیر mm ۱۵ است. لازم به ذکر است که پین‌های آماده‌سازی‌شده بر روی یک صفحه از جنس فولاد ۵۲۱۰۰ با سختی حدود ۸۰۰ ویکرز مورد آزمایش قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

آنالیز شیمیایی حاصل از روش کوانتومتری آلیاژهای آلومینیم در جدول(۲) نشان داده شده است. پس از مطابقت با استاندارد اروپایی در خصوص ترکیب شیمیایی آلومینیم و آلیاژهای آن (BS EN 573-3) مشخص گردید نمونه اول آلیاژ آلومینیم Al 5754 و نمونه دوم آلیاژ آلومینیم Al 6063 می‌باشد و بنابر خواص مکانیکی ارایه شده نشان می‌دهد که نمونه اول از سری 5XXX، آلیاژهای آلومینیم منیزیم کارسخت شده توسط نورد می‌باشدکه سختی آن یک چهارم سختی بیشینه است (H22) و نمونه دوم از سری 6XXX، آلیاژهای آلومینیم می‌باشد که رسوب سختی به فرم طبیعی صورت گرفته است (T4).

لازم به ذکر است که برای بدست آوردن بهترین سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار، سرعت‌های پیشروی mm/min ۴ و ۸ و سرعت‌های دورانی۱۰۰۰، ۱۴۰۰، ۱۶۰۰ و rpm ۲۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفتند و بهترین قطعات از لحاظ کیفیت ظاهری و عدم وجود عیوب در سرعت پیشروی mm/min ۴ و سرعت دورانی rpm ۲۰۰۰ بدست آمد (شکل۳).جهت حصول اطمینان بیشتر از عدم وجود عیب و همچنین بررسی سایز و اندازه عیب در صورت وجود، نمونه‌ها مورد بازرسی فراصوتی قرار گرفت. پس از انجام این آزمون، هیچگونه عیبی در قطعات فرآوری شده با سرعت پیشروی mm/min ۴ و سرعت دورانی۲۰۰۰rpm مشاهده نشد. ازآن‌جایی‌که روش رادیوگرافی یکی ازروش‌های پرکاربرد بازرسی جوش است، از این روش نیز جهت شناسایی عیوب جوش نمونه‌هایی که به روش اصطکاکی اغتشاشی تولید شده‌اند استفاده شد.

البته قابل ذکر است جهت نمونه‌های اولیه که داری سرعت های دورانی و پیشروی مناسب نبودند عیوب تونلی ملاحظه شد که در اینجا از آوردن گزارشات قطعات معیوب اولیه صرفنظر می‌شود. ولی پس از دستیابی و تنظیم سرعت پیشروی ۴ میلیمتر بر دقیقه و سرعت دورانی۲۰۰۰ دور بر دقیقه بهترین کیفیت جوش را از لحاظ عدم تولید عیوب تونلی و بهبود کیفیت سطحی می‌توان درنظرگرفت. همانگونه که تصاویر رادیوگرافی شکل(۴) مشخص است هیچ گونه عیبی در جوش‌ها مشاهده نشد و کلیه جوش‌ها عاری از عیوب هستند. برای تایید سلامت قطعات و بررسی ماکروساختار قطعات جوشکاری شده، مقطع عرضی قطعات پس از متالوگرافی مورد بررسی قرار گرفت (شکل۵).

جدول۲-آنالیز شیمیایی انجام شده بر روی نمونه‌ها.

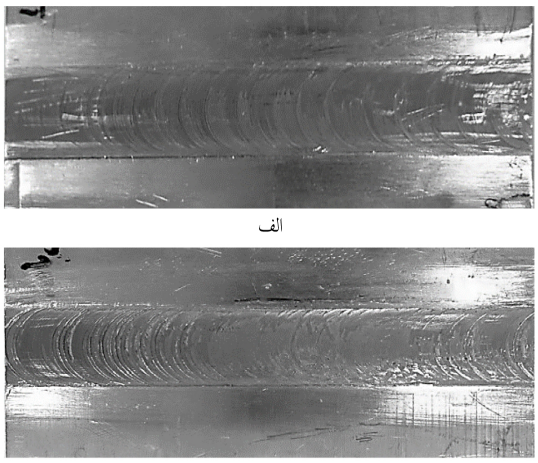
نمونه/عنصر	آلومینیم	سیلیسیم	آهن	مس	منگنز	منیزیم	روی	کروم	نیکل	تیتانیم
1	96.1	0.068	0.226	0.052	0.279	3.06	0.017	0.123	<0.005	0.018
2	98.8	0.389	0.177	0.024	0.014	0.479	<0.005	0.005	0.007	0.005

جدول۳- خواص مکانیکی نمونه‌ها

نمونه / خواص مکانیکی	استحکام تسلیم (N/mm^2)	استحکام کششی (N/mm^2)	کرنش شکست (%)	سختی (BHN)
1	145	225	37.53	76
2	105	143	16.33	50

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

همانطور که در شکل(۵) مشاهده می‌شود در هیچ‌یک از مقاطع عرضی نمونه‌ها اثری از عیوب معمول جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی وجود ندارد. به منظور ارزیابی استحکام کششی نمونه‌های اتصال یافته به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آزمون کشش بر روی نمونه‌ها انجام شد که نمودار تنش کرنش آن در شکل(۶) قابل مشاهده است. در نمونه‌هایی که دو آلیاژ آلومینیوم Al 5757 H22 و Al 6063 T4 به صورت غیرهمجنس جوشکاری شده است و نظر به اینکه این دو آلیاژ دارای میزان استحکام کششی متفاوت می‌باشند که به ترتیب ۲۲۵MPa و ۱۴۳ MPa اندازه‌گیری شده است؛ می‌توان اظهار کرد که، بهترین حالت شکست از ناحیه فلز پایه یا ناحیه متاثر از حرارت نزدیک به آلیاژی که استحکام کمتر دارد یعنی Al 6063T4 می‌باشد که حدود ۱۴۳ MPa استحکام کششی دارد.



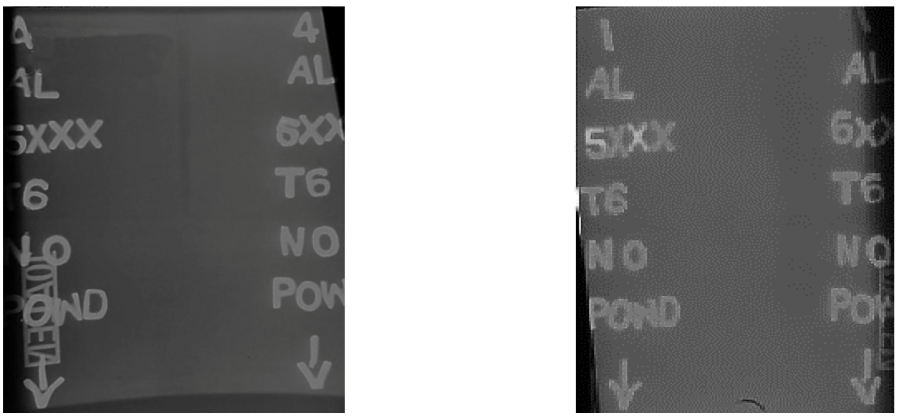
الف

ب

شکل۳- شمای ظاهری نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده غیر همجنس آلیاژهای آلومینیم ۵۷۵۴ به ۶۰۶۳؛ الف. بدون نانوذرات، ب. همراه با افزودن نانوذرات.

از طرف دیگر پودر نانو لوله کربن اضافه شده نیز اثر خود را بر روی میزان استحکام کششی پروفیل جوش دارد و می‌توان اثرات متفاوتی بر میزان تنش نهایی و میزان افزایش طول نمونه‌ها داشته باشد. هرچند میزان استحکام کششی نمونه‌هایی که از پودر نانو لوله کربن استفاده شده است کمتر از استحکام کششی نمونه بدون پودر است، ولی با توجه به شکست نمونه‌های حاوی نانو لوله کربنی از مرز ناحیه اغتشاش و ناحیه متاثر از حرارت و همچنین افزایش میزان تنش سیلان در کرنش‌های کمتر می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه جوشکاری شده تک پاسه به علت تجمع نانو لوله‌های کربنی در سمت پسرو باعث شکست در مرز ناحیه اغتشاش و ناحیه متاثر از حرارت شده است؛ ولی استحکام نهایی خود پروفیل جوش با حضور نانولوله‌ها افزایش یافته است. از طرفی با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری و لحاظ جهت معکوس ابزار، باعث توزیع مناسبتر نانو لوله‌های کربنی شده و استحکام جوش در نمونه دو پاس جوشکاری شده افزایش چشمگیری داشته است.

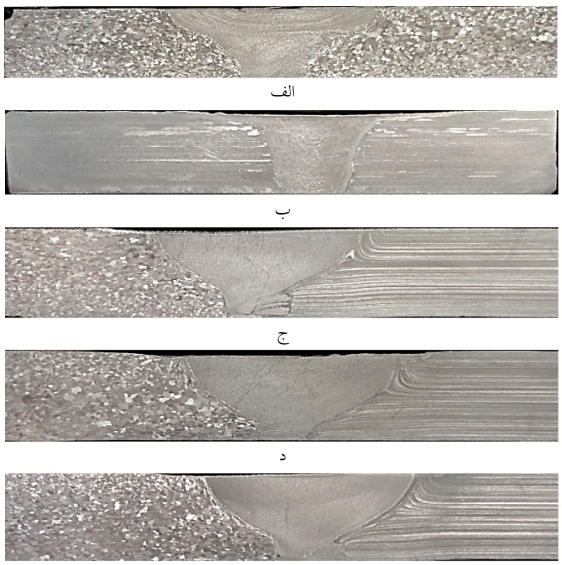
ارزیابی و تحلیل نمودارهای تنش و کرنش نمایانگر ایجاد اتصال مناسب بین دو فلز می‌باشد که بر انتخاب صحیح پارامترهای جوشکاری دلالت دارد. هر چند میزان تنش نهایی جهت نمونه‌هایی که از نانو لوله کربن استفاده شده است کمی کمتر از میزان تنش نهایی نمونه بدون پودر است ولی با توجه به شکست از ناحیه متاثر از حرارت در مورد نمونه‌هایی که از نانو لوله کربن استفاده شده است و همچنین افزایش میزان تنش نهایی در کرنش‌های کمتر می‌توان نتیجه گرفت، در نمونه یک پاس جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده، ناحیه اتصال به علت



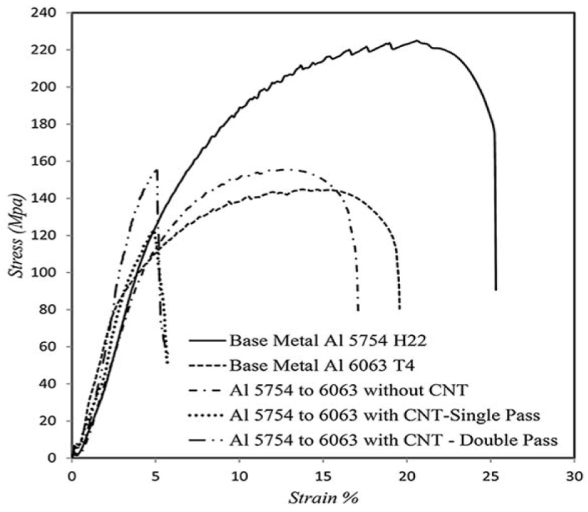
شکل۴- تصویر رادیوگرافی نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده غیر همجنس آلیاژهای آلومینیم ۵۷۵۴ به ۶۰۶۳؛ الف. با سرعت پیشروی mm/min ۴ و سرعت دورانی rpm ۲۰۰۰ که بدون عیب است، ب. با سرعت پیشروی mm/min ۸ و سرعت دورانی rpm ۱۶۰۰ که عیب تونلی در آن مشاهده می‌شود

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

تجمع نانو لوله‌های کربنی در سمت پسرو باعث شکست در ناحیه متاثر از حرارت شده است، ولی استحکام نهایی خودپروفیل جوش با حضور نانو ذرات افزایش یافته است.با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری و لحاظ جهت معکوس چرخش ابزار باعث توزیع مناسبتر نانولوله‌های کربنی شده و استحکام جوش در نمونه دو پاس جوشکاری شده افزایش یافته است.

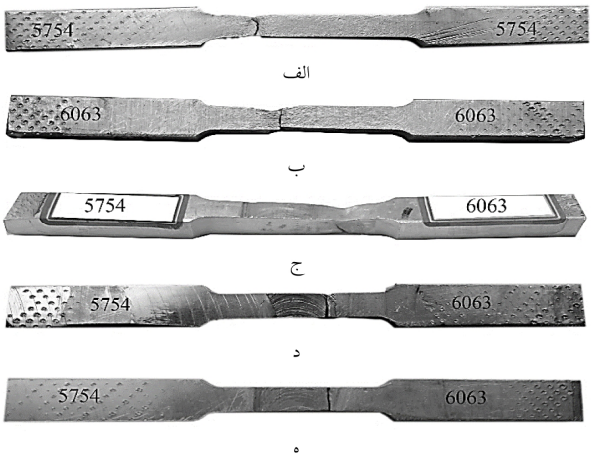


شکل ۵- تصاویر ماکروگرافی از مقاطع جوش نمونه ها؛ الف. ۵۷۵۴-۵۷۵۴، ب. ۶۰۶۳-۶۰۶۳، ج. ۵۷۵۴-۶۰۶۳، د. ۵۷۵۴-۶۰۶۳ با افزودن نانولوله های کربنی و ه. ۵۷۵۴-۶۰۶۳ با افزودن نانولوله های کربنی و دو پاس فرایند جوشکاری



شکل۶-نمودار تنش کرنش نمونه های خام و اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم ۵۷۵۴ و ۶۰۶۳ با و بدون اضافه کردن نانولوله های کربنی.

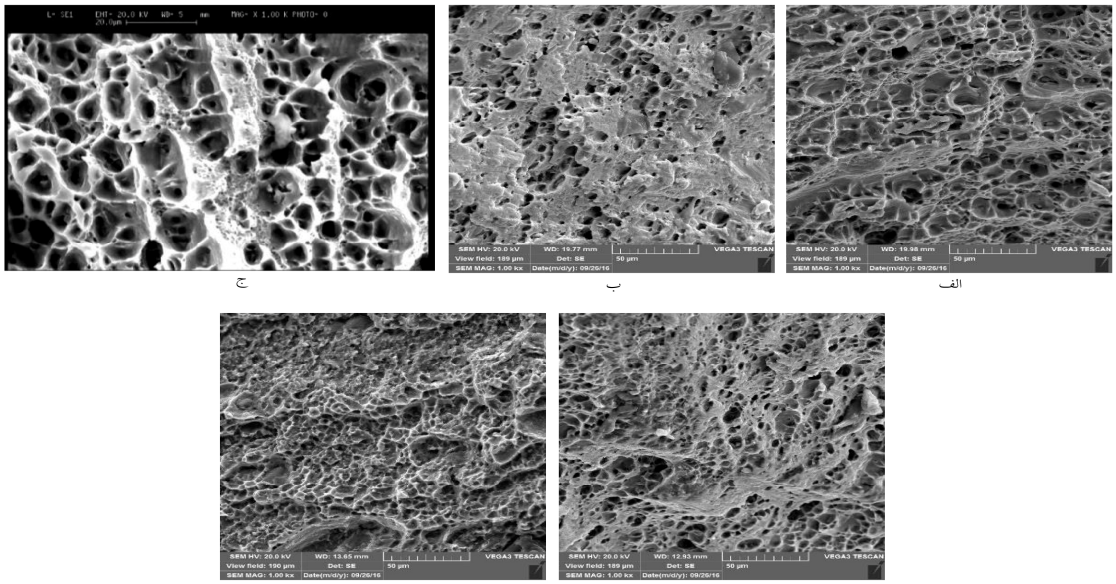
تصویر ماکروسکپی نمونه‌های آزمون کشش بعد از شکست در شکل(۷) نشان داده شده است. در جوشکاری غیرهمجنس آلیاژ آلومینیم۵۷۵۴ به ۶۰۶۳، نمونه آزمون کشش از مرز میان ناحیه اغتشاش و ناحیه متاثر از حرارت در سمت آلیاژ ۶۰۶۳ (سمت پیشرو) که محل تجمع نانو لوله‌های کربنی پس از یک پاس فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است، دچار شکست شده است (شکل‌های۷-ج، ۷-د و ۷-ه). افت خواص مکانیکی در ناحیه متاثر از حرارت به دلیل رشد دانه‌ها سبب تمرکز شکست در این ناحیه شده است. علاوه بر این آلیاژهای آلومینیوم سری 6xxx، از دسته آلیاژهای رسوب سخت شونده هستند.



شکل۷- تصاویر ماکروسکپی نمونه‌های جوشکاری شده بعد از آزمون کشش؛ الف. نمونه خام ۵۷۵۴، ب. نمونه خام ۶۰۶۳، ج. اتصال ۵۷۵۴-۶۰۶۳، د. اتصال ۵۷۵۴-۶۰۶۳ با افزودن نانولوله های کربنی و ه. اتصال ۵۷۵۴-۶۰۶۳ با افزودن نانولوله های کربنی و دو پاس فرایند جوشکاری.

در حین فرآیند به دلیل حرارت بالای ایجاد شده در ناحیه اغتشاش (حدود^{o}C ۴۰۰) رسوبات در ناحیه اغتشاش حل می‌شوند که به نوبه خود سبب افت خواص مکانیکی در ناحیه اغتشاش می‌شود که موید شکست این نمونه‌ها از ناحیه اغتشاش است. انحلال رسوبات در ناحیه متاثر از حرارت در آلیاژهای آلومینیم سری 6XXX و افت خواص مکانیکی و متعاقبا شکست در این ناحیه توسط پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است [۲۷و ۲۸].

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل۸-تصاویر میکروسکپی از ناحیه شکست نمونه‌های جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی شده؛ الف. نمونه خام ۵۷۵۴، ب. نمونه خام ۶۰۶۳، ج. اتصال ۵۷۵۴-۶۰۶۳، د. اتصال ۵۷۵۴-۶۰۶۳ با افزودن نانولوله های کربنی و ه. اتصال ۵۷۵۴-۶۰۶۳ با افزودن نانولوله های کربنی و دو پاس فرایند جوشکاری.

با توجه به محل شکست نمونه‌های اتصال غیرهمجنس می‌توان نتیجه گرفت که اتصال برقرار شده به روش اصطکاکی اغتشاشی عاری از عیوبی نظیر حفره و عدم نفوذ است.

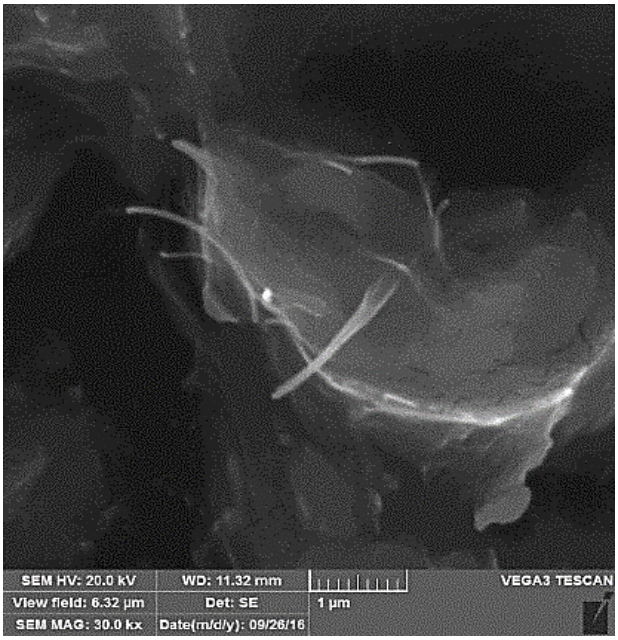
در شکل(۸)، تصاویر میکروسکپی از ناحیه شکست اتصال آلیاژهای آلومینیوم۵۷۵۴ و ۶۰۶۳ مشاهده می‌شود. براساس دیمپل‌های موجود در سطح شکست، همانطور که انتظار می‌رود مکانیزم شکست آلیاژهای آلومینیم شکست نرم می‌باشد. عدم وجود ناحیه شکست ترد در تصاویر میکروسکپی سطح شکست نشان‌دهنده عدم تشکیل فاز ترد در حین فرآیند اتصال می‌باشد. با مقایسه تصاویر(۸-ج،۸-د و ۸-ه) مشاهده می‌شود که اندازه دیمپل‌ها با افزودن نانولوله های کربنی کاهش پیدا می‌کند که دلیل این امر را می‌توان به اثر قفل کنندگی مرزدانه‌ها توسط نانوذرات در حین فرایند تبلور مجدد دینامیک نسبت داد. علاوه بر آن با افزایش تعداد پاس‌های فرایند اندازه دیمپل‌ها کاهش بیشتری نشان می‌دهد که دلیل آن را می‌توان به کاهش اندازه دانه در نتیجه افزایش تعداد پاس‌های فرایند اصطکاکی اغتشاشی نسبت داد [۲۳و۲۹]. با بررسی سطح شکست نمونه‌های حاوی نانوذرات در بزرگنمایی‌های بالاتر می‌توان ذرات نانولوله های کربنی توزیع شده در نمونه‌ها در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را مشاهده نمود (شکل۹).

همانگونه که در شکل(۱۰) مشخص است میزان سختی اولیه جهت آلیاژ آلومینیمAl 5754 H22 حدود ۷۹ ویکرز و جهت آلیاژ Al 6063 T4 حدود ۵۰ ویکرز اندازه‌گیری شده است. پس از انجام جوشکاری به روش اصطکاکی اغتشاشی توزیع میزان سختی در پروفیل جوش در نمونه‌ای که بدون ذرات نانو لوله کربنی است، توزیع میزان سختی در پرفیل جوش وابسته به فاصله مرکز جوش تا فلز پایه است و این میزان سختی تقریبا از یک رابطه خطی بین سختی دو آلیاژ پیروی می‌نماید. در نمونه دوم توزیع ذرات فاز ثانویه در هنگام جوشکاری باعث شده است، میزان سختی در ریزساختار پروفیل جوش افزایش یابد. به عبارت دیگر می‌توان گفت افزایش میزان سختی کامپوزیتی به علت تاثیر ذرات پودر و ترکیبات بین فلزی روی ریز ساختار زمینه آلومینیمی است. این ذرات باعث افزایش میزان جوانه زنی در هنگام تبلور مجدد دینامیکی منطقه تحت سیلان می‌شود و میزان ریزسختی افزایش می‌یابد.

در ضمن وجود ذرات پودری می‌تواند موجب افزایش میزان نابجایی و واپیچش‌های ساختاری آلومینیم می‌شود. دلیل افزایش نابجایی‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت ضریب انتقال حرارت، ضریب انبساط حرارتی و همچنین تفاوت مدول الاستیک فاز زمینه و پودر باشد [۳۰]. هر چند در نمونه دوم توزیع سختی

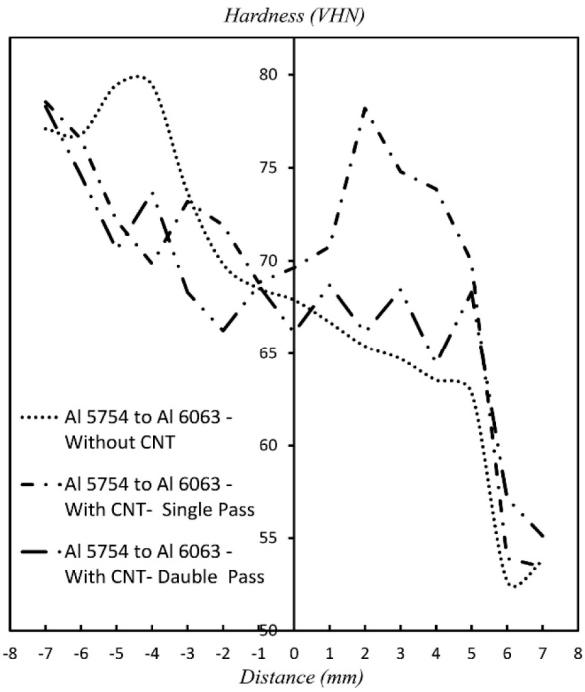
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

نسبت به نمونه اول به طور یکنواخت‌تری صورت پذیرفته است، ولی در نمونه سوم که به صورت دو پاس جوشکاری شده است، افزایش میزان اغتشاش باعث توزیع مناسب‌تر و یکنواخت‌تر ذرات پودر در پروفیل جوش شد و ساختار همگن‌تری از لحاظ دانه‌بندی بوجود آورد. میزان متوسط سختی اندازه‌گیری شده نمونه دو پاسه حدود ۶۸ ویکرز به‌دست آمد که میزان توزیع سختی یکنواختی از نمونه یک پاس را دارد. این نوع افزایش سختی ناشی از توزیع همگن پودر در تئوری اوروان مطرح شده است [۳۱].



شکل۹-تصویر میکروسکپ الکترونی از محل شکست نمونه‌ی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده حاوی نانولوله‌های کربن

مطالعه بر روی خواص سایشی نمونه‌ها از طریق آنالیز نمودارهای کاهش وزن و طیف های سیگنالی مربوط به ضریب اصطکاک نمونه ها انجام گرفت (شکل۱۱). در نمودار های مربوط به ضریب اصطکاکی، دامنه تغییرات ضریب اصطکاکی تقریباً یکنواخت است و میانگین ضریب اصطکاکی بدست آمده برای نمونه فلز پایه (۰/۸۵) بیشتر از بقیه نمونه ها است و پس از آن به ترتیب نمونه‌های یک پاس بدون پودر نانو (۰/۷۲) ، یک پاس همراه پودر نانو (۰/۶۲) و دو پاس با پودر نانو (۰/۶۰). این کاهش ضریب اصطکاک در نمونه بدون پودر نانو، حاصل ریز شدن دانه ها در ناحیه اغتشاشی و همگن سازی نانو فازهای آلیاژ آلومینیم است. در نمونه‌های که حاوی پودر نانو لوله کربنی بوده‌اند، علاوه بر این ناشی از خواص ضد سایشی مربوط به ذرات نانو لوله کربن نیز است، همچنین اجرای تعداد پاس‌های بیشتر باعث ریزتر شدن دانه بندی و تجزیه ذرات زمخت و خشن و پراکنده کردن این ذرات در شبکه فلز پایه و همچنین توزیع یکنواخت نانولوله های کربنی که در نهایت، این عوامل باعث کم شدن ضریب اصطکاک و کاهش وزن در طی آزمون سایش شده است. با تحلیل روند نمودارها می‌توان دید که نمونه‌های فرآوری شده دارای ضریب اصطکاکی پائین‌تری نسبت به فلز پایه است و همچنین اثر تعداد پاس بیشتر نیز باعث کاهش ضریب اصطکاکی در سطوح نانو ماده مرکب شده است.

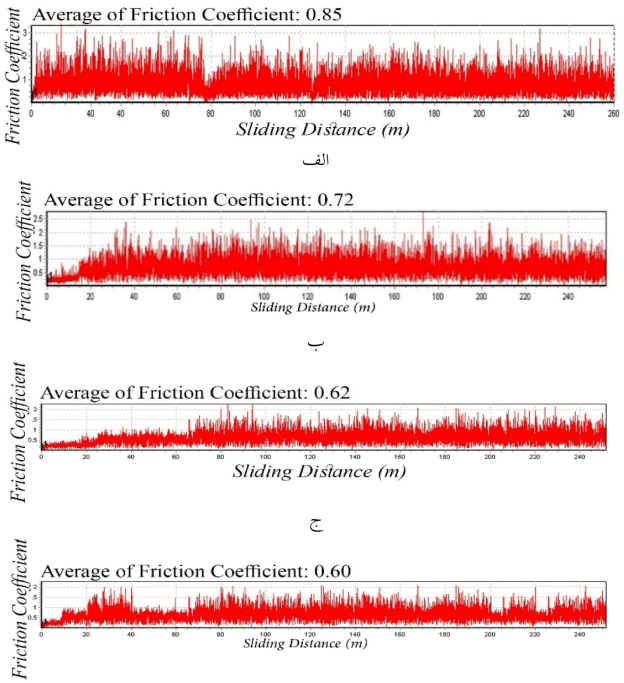


شکل۱۰- مقایسه ریزسختی نمونه‌های جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی شده

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم ۵۷۵۴ و ۶۰۶۳ به صورت موفقیت‌آمیز به روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی با افزودن نانولوله‌های کربنی انجام شد. مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل۱۱-تغییرات ضریب اصطکاک در نمونه‌های الف. نمونه خام ۶۰۶۳، ب. اتصال ۵۷۵۴-۶۰۶۳، ج. اتصال ۵۷۵۴-۶۰۶۳ با افزودن نانولوله های کربنی و د. اتصال ۵۷۵۴-۶۰۶۳ با افزودن نانولوله های کربنی و دو پاس فرآیند جوشکاری.

- جوشکاری غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم ۵۷۵۴ به ۶۰۶۳ با استفاده از ابزار استوانه‌ای رزوه دار با سرعت پیشروی ۴ mm/min و سرعت دورانی rpm ۲۰۰۰ با موفقیت انجام شد.

- با افزودن نانوذرات در ناحیه اغتشاشی قطعات جوشکاری شده، نانوکامپوزیت آلیاژ آلومینیم- نانولوله‌های‌کربنی تولید شده است.

-افزودن نانولوله های کربنی به دلیل تاخیر در رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته، افزایش مکان‌های جوانه‌زنی و شکستن دانه‌های اولیه در حین تغییر فرم پلاستیک شدید ساختار سبب ریزدانگی ریزساختار ناحیه اغتشاشی شده است.

- میزان استحکام کششی نمونه‌های جوشکاری شده در حضور نانولوله های کربنی، بیشتر از نمونه های جوشکاری شده بدون اضافه کردن نانوذرات بود.

- با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، توزیع نانوذرات در ناحیه اغتشاش نمونه‌ها بهبود یافت و لذا استحکام کششی و سختی بالاتری از خود نشان داد.

- اجرای فرایند اصطکاکی- اغتشاشی باعث بهبود خواص سایشی نانو ماده مرکب سطحی آلیاژ آلومینیوم/ نانولوله کربن نسبت به فلز پایه شد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر برگرفته از نتایج طرح پژوهشی با عنوان "بررسی تاثیر نوع نانوذرات تقویت‌کننده بر خواص نانوکامپوزیت سطحی ایجاد شده بر روی آلیاژ آلومینیم" (شماره ۵۱۶۳۴۹۱۰۹۱۰۰۰۹) مصوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز می‌باشد که بدینوسیله از معاونت محترم پژوهش و فناوری بابت تأمین هزینه های طرح تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

منابع

1-G. Mathers, *1 - Introduction to the welding of aluminium*, in: *The Welding of Aluminium and its Alloys*, Eds., pp. 1-9: Woodhead Publishing, 2002 .
2- J. Qu, H. Xu, Z. Feng, D. A. Frederick, L. An, H. Heinrich, Improving the tribological characteristics of aluminum 6061 alloy by surface compositing with sub-micro-size ceramic particles via friction stir processing, *Wear*, Vol. 271, No. 9-10, pp. 1940-1945, 2011 .
3- Z. Y. Ma, Friction Stir Processing Technology: A Review, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 39, No. 3, pp. 642-658, 2008 .
4- R. S. Mishra, Z. Y. Ma, I. Charit, Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 341, No. 1, pp. 307-310, 2003/01/20/, 20 .۰۳
5- V. Sharma, U. Prakash, B. V. M. Kumar, Surface composites by friction stir processing: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 224, pp. 117-134, 2015 .
6- H. S. Arora, H. Singh, B. K. Dhindaw, Composite fabrication using friction stir processing—a review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 9-12, pp. 1043-1055, 2011 .
7- L. E. Murr, A Review of FSW Research on Dissimilar Metal and Alloy Systems, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 8, pp. 1071-1089, 2010 .
8- B. T. Gibson, D. H. Lammlein, T. J. Prater, W. R. Longhurst, C. D. Cox, M. C. Ballun, K. J. Dharmaraj, G. E. Cook, A. M. Strauss, Friction stir welding: Process, automation, and control, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, No. 1, pp. 56-73, 2014 .
9- R. Nandan, T. Debroy, H. Bhadeshia, Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, *Progress in Materials Science*, Vol. 53, No. 6, pp. 980-1023, 2008 .

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

of Advanced Materials In Engineering,
23-K. J. Al-Fadhalah, A. I. Almazrouee, A. S. Aloraier, Microstructure and mechanical properties of multi-pass friction stir processed aluminum alloy 6063, *Materials & Design,* Vol. 53, pp. 550-560, 2014 .
24-R. Vatankhah Barenji, V. M Khojastehnezhad, H. H Pourasl, A. Rabiezadeh, Wear properties of Al–Al2O3/TiB2 surface hybrid composite layerprepared by friction stir process, *Journal of Composite Materials,* Vol. 50, No. 11, pp. 1457-1466, 2015 .
25-A. Scialpi, L. A. C. De Filippis, P. Cavaliere, Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy, *Materials & Design,* Vol. 28, No. 4, pp. 1124-1129, 2007 .
26-C. Jonckheere, B. de Meester, A. Denquin, A. Simar, Torque, temperature and hardening precipitation evolution in dissimilar friction stir welds between 6061-T6 and 20-۱۴T6 aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 213, No. 6, pp. 826-837, 2013 .
27-E. A. El-Danaf, M. M. El-Rayes, Microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 AA in as welded and post weld heat treated conditions, *Materials & Design,* Vol. 46, pp. 561-572, 2013 .
28-J. Dong, D. Zhang, W. Zhang, W. Zhang, C. Qiu, Microstructure Evolution during Dissimilar Friction Stir Welding of AA7003-T4 and AA6060-T4, *Materials (Basel),* Vol. 11, No. 3, Feb 27, 2018 .
29-H. Izadi, A. P. Gerlich, Distribution and stability of carbon nanotubes during multi-pass friction stir processing of carbon nanotube/aluminum composites, *Carbon,* Vol. 50, No. 12, pp. 4744-4749, 2012 .
30- D. Storjohann, O. M. Barabash, S. A. David ,P. S. Sklad, E. E. Bloom, S. S. Babu, Fusion and friction stir welding of aluminum-metal-matrix composites, *Metallurgical and Materials Transactions A,* Vol. 36, No. 11, pp. 3237-3247, November 01, 2005 .
31-M. Azizieh, A. H. Kokabi, P. Abachi, Effect of rotational speed and probe profile on microstructure and hardness of AZ31/Al2O3 nanocomposites fabricated by friction stir processing, *Materials & Design,* Vol. 32, No. 4, pp. 2034-2041, 2011 .
32-M. Bahrami, K. Dehghani, M. K. Besharati Givi, A novelapproach to develop aluminum matrix nano-composite employing friction stir welding technique, *Materials & Design,* Vol. 53, No. Supplement C, pp. 217-225, 2014/01/01/, 2014 .
33-M. Farahmand Nikoo, N. Parvin, M. Bahrami, Al2O3-fortifed AA6061-T6 joint produced via friction stir welding: The effects of traveling speed on microstructure, mechanical, and wear properties, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications,* Vol. 231, No. 6, pp. 534-54,2015,3 .
34-M. Saeidi, M. Barmouz, M. K. B. Givi, Investigation on AA5083/AA7075+Al2O3 Joint Fabricated by Friction Stir Welding: Characterizing Microstructure, Vol. 18, No. 6, pp. 1156-1162, 2015 .
10-M .K. Besharati Givi, P. Asadi, *1 - General introduction,* in: *Advances in Friction-Stir Welding and Processing,* Eds., pp. 1-19: Woodhead Publishing, 2014 .
11-P. Hema, K. Sai kumar naik, K. Ravindranath, Prediction of Effect of Process Parameters on Friction Stir Welded Joints ofdissimilar Aluminium Alloy AA2014 & AA6061 Using Taper Pin Profile, *Materials Today: Proceedings,* Vol. 4, No. 2, pp. 2174-2183, 2017 .
12-G. D'Urso, C. Giardini, S. Lorenzi, M. Cabrini, T. Pastore, The Effects of Process Parameters on Mechanical Properties and Corrosion Behavior in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys, *Procedia Engineering,* Vol. 183, pp. 270-276, 2017 .
13-A. Tavassolimanesh, A. Alavi Nia, A new approach for manufacturing copper-clad aluminum bimetallictubes by friction stir welding (FSW), *Journal of Manufacturing Processes,* Vol. 30, pp. 374-384, 2017 .
14-H. K. Sharma, K. Bhatt, K. Shah, U. Joshi, Experimental Analysis of Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys AA6061 and Mg AZ31 Using Circular Butt Joint Geometry, *Procedia Technology,* Vol. 23, pp. 566-572, 2016 .
15-G. Pradeep Kumar Reddy, B. Ratna Sunil, B. Balakrishna, Joining of AZ31 Mg alloy sheets by friction stir welding and investigating corrosion initiated failure, *Materials Today: Proceedings,* Vol. 4, No. 6, pp. 6712-6717, 2017 .
16-K. Gangwar, M. Ramulu, Friction stir welding of titanium alloys: A review, *Materials & Design,* 2017 .
17-H. Liu, H. Fujii, Microstructural and mechanical properties of a beta-type titanium alloy joint fabricated by friction stir welding, *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 711, pp. 140-148, 2018 .
18-R. Mohammed, G. Madhusudhan Reddy, K. Srinivasa Rao, Welding of nickel free high nitrogen stainless steel: Microstructure and mechanical properties, *Defence Technology,* Vol. 13, No. 2, pp. 59-71, 2017 .
19-T. Mira-Aguiar, D. Verdera, C. Leitão, D. M. Rodrigues, Tool assisted friction welding: A FSW related technique for the linear lap welding of very thin steel plates, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 238, pp. 73-80, 2016 .
20-M. Ahl Sarmadi, M. Shamanian, H. Edris, M. Atapoor, A. Behjat, M. Mohtadi Bonab, J. Szpunar, Friction Stir Welding of Super Duplex Stainless Steel of UNS S32750, Its Microstructure Evaluation, Mechanical and Corrosion Properties, *Journal of Advanced Materials In Engineering,* Vol. 36, No. 1, pp. 97-120, 2017. eng
21-M. Sadeghi Gogheri, M. Shabani, E. Mirzapour, M. Kasiri, K. Amini, Friction stir welding of dissimilar joint of aluminum alloy 5083 and commercially pure titanium, *IRANIAN JOURNAL OF Science and Technology of Welding,* Vol. 2, No. 1, pp. 49-56, 2016. eng
22-A. H. Khosrovaninezhad, M. Shamanian, A. Rezaeian, M. Atapour, Investigation of the Mechanical Properties of AISI 316 Austenitic Stainless Steel and St 37 Low Carbon Steel Dissimilar Joint by Friction Stir Vol. 34, No. 2, pp. 89-101, 2015. eng Welding, *Journal*

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

35-P. Vijaya Kumar, G. Madhusudhan Reddy, K. Srinivasa Rao, Microstructure and pitting corrosion of armor grade AA7075 aluminum alloy friction stir weld nugget zone – Effect of post weld heat treatment and addition of boron carbide, *Defence Technology*,Vol. 11, No. 2, pp. 166-173, 2015 .

36-A. Hamdollahzadeh, M. Bahrami, M. Farahmand Nikoo, A. Yusefi, M. K. Besharati Givi, N. Parvin, Microstructure evolutions and mechanical properties of nano-SiC-fortified AA7075 friction stir weldment: The role of second pass processing, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 20, pp. 367-373, 2015 .

37-M. Saeidi, R. Abdi Behnagh, B. Manafi, M.Farahmand Nikoo, M. K. Besharati Givi, Study on ultrafine-grained aluminum matrix nanocomposite joint fabricated by friction stir welding, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 230, No. 1, pp. 311-318, 2015 .

38-R. R. Baridula, R. V. Ramaraju, A. B. Ibrahim, M. F. B. C. Ku, Effect of Nano Particle Deposition on Mechanical Properties of Friction Stir Welded Dissimilar Aluminium Alloys by Taguchi Technique, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 70, No. 4, pp. 1005-1017, 2016 .

39-M. Bodaghi, K. Dehghani, Friction stir welding ofAA5052: the effects of SiC nano-particles addition, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88, No. 9-12, pp. 2651-2660, 2016 .

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]