نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 1، بهار و تابستان1397، صفحه 18-1

بررسی اثر حضور لایه واسط AA7075 بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لب به لب AA1050 جوشکاری شده به روش FSW

عبدالرزاق رضوی، حامد ثابت *

گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۲ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۳)

چکیده

در تحقیق حاضر، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سر به سر آلومینیوم خالص تجاری ۱۰۵۰با استفاده از لایه میانی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵در سرعت های خطی ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه و سرعت های چرخشی ۸۰۰ و ۱۲۰۰ دور در دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مقایسه بهتر، نمونه های بدون لایه میانی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵نیز جوشکاری شدند. یک ابزار استوانه ای رزوه دار از جنس فولاد گرم کار بمنظور اتصال ورق‌های ۵میلی متری استفاده شد. بررسی‌های لازم توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و همچنین انجام آزمونهای ریزسختی و کشش صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که اتصال بدست آمده تحت سرعت چرخشی ۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۳۰ میلیمتر بر دقیقه در نمونه های با لایه میانی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵دارای بالاترین استحکام کششی و ریزسختی و اتصال بدست آمده تحت سرعت چرخشی ۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه، درنمونه های بدون لایه میانی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵دارای بالاترین میزان استحکام کششی و ریزسختی می باشد. نتایج آزمون های کشش و ریزسختی مشخص نمودند که استفاده از لایه میانی باعث افزایش استحکام کششی و ریزسختی در تمامی نمونه ها می گردد .

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلومینیوم خالص تجاری ۱۰۵۰، آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ ، لایه میانی.

The Effect of the AA7075 Interlayer on the Microstructure and Mechanical Properties of the AA1050 Butt Joint Welded by FSW

A.S. Razavi[1] , H. Sabet[1*]

Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran..

(Received 1 January 2017 ; Accepted 4 July 2017)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h-sabet@kiau.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

Abstract
In this research, the FSW Butt joint of commercial aluminum 1050 was investigated by using the 7075 aluminum alloy interlayer on the linear velocity of 30, 50 and 100 mm / min, and rotational speeds of 800 and 1200 rpm. A threaded cylindrical tool was used for joining of the 5 mm sheets. The OM, SEM, microhardness and tensile tests were done. The results shows that in sample with an interlayer at the condition of the 800 rpm and 30 mm/min the maximum tensile strength and hardness appeared and in the non-layered sample at the 800 rpm and 50 mm/min, the maximum tensile strength and hardness was obtained. The results shows that by using the interlayer the tensile strength and hardness were increase.

Keywords: FSW, Al 1050, Al 7075, Interlayer.

1- مقدمه

کاهش وزن وسایل نقلیه جاده‌ای و هوایی یکی از راهکارهای عملی برای محافظت از محیط زیست و ذخیره انرژی بوسیله کاهش مصرف سوخت است. تولید قطعات سبک از موادی نظیر آلومینیوم یکی از این اقدامات است. آلیاژهای آلومینیوم با توجه به چگالی کم، استحکام مخصوص بالا، خواص ضد خوردگی خوب، استفاده‌های گسترده‌ای در صنایع مختلف به ویژه هوافضا و خودرو سازی دارند. یکی ازچالش های پیشرو استفاده از این آلیاژها اتصال آنهاست، با توجه به هدایت حرارتی بالا و نقطه ذوب پایین اتصال ذوبی این آلیاژها همواره دارای عیوب حجمی و صفحه ای متعدد می باشتد. استفاده از جوشکاری حالت جامد اصطکاکی اغتشاشی (FSW) می تواند راه کاری مناسب برای حذف عیوب و افزایش تیراژ تولید باشد. (FSW)، یک فرآیند جوشکاری حالت جامد است که بوسیله انجمن جوشکاری انگلستان (TWI) در سال ۱۹۹۱ ارائه شد و به دلیل دمای کمتر فرآیند نسبت به جوشکاری‌های ذوبی رایج، یک روش بالقوه است[۱]. مزایای ویژه این فرآیند سبب استفاده گسترده از آن در صنعت شده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند برای جوشکاری اکثر آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار گیرد و اکسید سطحی مانعی برای انجام فرآیند نیست و نیاز به تمیزکاری اولیه قبل از جوشکاری ندارد[۲].

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی،شانه ابزار و پین برای جوش دادن می‌چرخند و روی محل اتصال دو تکه ورق حرکت می‌کنند که گرمای ناشی از اصطکاک باعث می شود تا موادی که باید جوش بخورند به حالت پلاستیک برسند و تحت فرآیند چرخش و فشار به هم متصل شوند. پین سه متغیر حرارت قطعه کار، جابجایی مواد برای ایجاد اتصال و مهار فلز داغ در زیر شانه را ارائه می‌دهد. حرارت هم به وسیله حرکت چرخشی ابزار و شانه ابزار و هم به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید قطعه کار بوجود می‌آید. پارامترهای جوشکاری، هندسه ابزار و طراحی اتصال تأثیر مهمی را روی الگوی جریان مواد و توزیع حرارت می‌گذارد و بنابراین بر تکامل ساختاری مواد بسیار موثر است[۲].

در سال های اخیرتحقیقات گسترده ای جهت بهبود خواص مکانیکی در محل اتصال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام گرفته است. برای مثال Ahn و همکارانش [۳]، به بررسی تولید کامپوزیت SiC/AA5083 توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. آنها نشان دادند که ذرات SiC به علت به دام افتادن موجب ریزتر شدن دانه ها شدند، ناحیه اغتشاشی با ذرات SiC شامل دانه های بسیار ریزتری نسبت به ناحیه اغتشاشی بدون ذراتSiC بودند.ناحیه کامپوزیت SiC/AA5083 سختی در حدود ۹۰ ویکرز نشان داد که بیشتر از ناحیه اغتشاشی۸۰ویکرز بدون ذرات بود. همچنین کربلایی حسینی و همکارانش[۴]، به بررسی اثر افزودن نانو ذرات Al_2O_3 با حداکثر اندازه ۳۰۰ نانومتر به درز اتصال جوشکاری آلیاژ آلومینیوم 6013 با هدف بهبود خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم پرداختند. طبق نتایج حاصل از این تحقیق، سختی اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی با حضور ذرات Al_2O_3 بیشتر از سختی جوش بدون نانو ذرات بوده و سختی ناگت جوش اصطکاکی اغتشاشی نسبت به فلز پایه افزایش پیدا نموده بود.در تحقیقات

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

قبلی اثرمحیط خنک کننده برریزساختاراتصال آلیاژ آلومینیوم 7075 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن ها مشخص نمود که باانجام جوشکاری درزیر آب اندازه دانه های تبلورمجددیافته دینامیکی ومتوسط قطر کل رسوبات درمنطقه ناگت کاهش یافته و کسرحجمی این رسوبات درمقایسه باقطعات جوشکاری شده در شرایط معمولی افزایش یافته است[۵و۶].ثابت و همکارانش[۷]، به بررسی اثر متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب، نظیر سرعت خطی، سرعت چرخشی و دمای آب، بر ریز ساختار و خواص مکانیکی جوش آلیاژ آلومینیوم 4343 پرداختند. نتایج بازرسی چشمی سطوح اتصال نمونه های گوناگون مشخص نمود که قطعات جوشکاری شده در زیر آب و در هوا از نظر شکل ظاهری مشابه بوده و بدون عیب می باشند. طبق بررسی‌های ریزساختاری، با کاهش دمای آب و افزایش شدت خنک کنندگی محیط جوشکاری در یک گام جوشکاری ثابت، اندازه رسوبات Si_2Feو فاز β کوچکتر شده و اندازه دانه ها کاهش می یابد. همچنین با افزایش شدت خنک کنندگی محیط در یک گام جوشکاری ثابت، سختی، استحکام کششی و استحکام تسلیم افزایش یافته و درصد ازدیاد طول نسبی کاهش می یابد.

داشتن خواص موضعی به جهت کاهش هزینه از چالش های پیش روی طراحان و صنعتگران است. به عنوان مثال سخت‌کاری سطحی و پوشش های موضعی از این دست اقدامات است. در تحقیق حاضر سعی بر آن بوده است تا با استفاده از لایه واسط در منطقه جوش، خواص مکانیکی و ریزساختاری به وسیله آلیاژسازی موضعی ارتقا یابد.طی بررسی های صورت گرفته، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی هم جنس آلومینیوم 1050با استفاده از لایه میانی(واسط) آلیاژی در هیچ تحقیقی گزارش نشده است و تحقیقات مشابه صورت گرفته اکثرا در زمینه اعمال پودر بین دو ورق در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جهت بهبود ساختار و رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب مورد نظر می باشند. بنابراین هدف از این تحقیق، اتصال آلومینیوم 1050 با استفاده و بدون استفاده از لایه میانی(واسط) از جنس آلیاژ آلومینیوم 7075به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و بررسی ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال و بدست آوردن اتصالی بدون عیب می‌باشد و شروع راهی تازه برای ارتقا موضعی خواص منطقه جوش باشد، تا با استفاده از مقدار اندکی آلومینیوم آلیاژی خواص مکانیکی آلومینیوم خالص تجاری که قیمت آن به مراتب پایین‌تر از آلومینیوم آلیاژی است به مقدار قابل توجهی افزایش یابد.

2- روش تحقیق

برای جوشکاری لب به لب ورق‌های آلومینیوم از ورق AA1050و لایه میانیAA7075 استفاده گردید. آزمون تعیین ترکیب شمیایی به روش اسپکتروگرافی نشر نوری[1] مطابق با استاندارد مرجع ASTM E1251-11[8] انجام شد و طبق این آزمایش ترکیب شیمیایی هر کدام از ورق ها در جدول(۱) ارائه شده است.سطح کلیه ورق‌های برش خورده قبل از جوشکاری به منظور از بین بردن چربی ها و اکسید های سطحی ابتدا توسط سنباده و سپس با استون تمیز گردیده و سپس جوشکاری در دو وضعیت انجام پذیرفت بدین صورت که یکبار ورق های AA1050 به یکدیگر جوش داده شدند و سپس با استفاده از لایه میانی AA7075 جوشکاری صورت گرفت.

ابعاد ورق های آلومینیوم بکار رفته در جدول(۲) ارائه شده است.بمنظور جوشکاری در این تحقیق از دستگاه فرز سنگین با توان اسمی ۷kW استفاده گردید. پیشروی ابزار با وقفه ۱۵ ثانیه بعد از تماس شانه در حال چرخش با سطح قطعه آغاز می‌شد تا ماده در زیر شانه به اندازه کافی گرم شده باشد. فرایند در دمای محیط، بدون پیشگرم انجام شد. مشخصات کامل ابزار در جدول (۳) ارائه شده است.همچنین تصویر ابزار در شکل(۱) ارائه شده است.

2-1- متغیرهای جوشکاری

متغیرهای موجود در این تحقیق به شرح زیر انتخاب شدند:

الف- سرعت چرخشی،

ب- سرعت خطی، و

1-Optical Emission Spectroscopy

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

جدول 1- ترکیب شیمیایی(درصد وزنی)آلومینیوم1050و7075.

درصد وزنی	Al	Zn	Mg	Cu	Si	Mn	Fe	Ti	Cr
1050	پایه	۰/۰۲۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۲	۰/۱۰۰	۰/۰۱۰	۰/۲۲۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲
7075	پایه	۵/۲۸۰	۲/۴۰۰	۱/۴۲۰	۰/۳۰۲	۰/۱۴۳	۰/۴۳۷	۰/۰۵۰	۰/۲۳۹

جدول 2- ابعاد ورق های آلومینیوم.

ورق ها	طول(mm)	عرض(mm)	ضخامت(mm)	تصویر
1050	۱۵۰	۵۰	۵	
7075	۱۵۰	۲	۵	

جدول 3- مشخصات ابزار [18و19].

جنس	نوع ابزار	قطر شانه (mm)	قطر پین (mm)	ارتفاع پین (mm)	عمق فروروی پین(mm)	طول گام (mm)	زاویه تقعر کف شانه	زاویه ابزار نسبت به راستای عمود بر نمونه ها
فولاد کار گرم H13	استوانه ای رزوه دار	۱۸	۶	۴/۷	۴/۹	۱	۶°	۳°

ج- حضور و عدم حضور لایه واسط.

در جدول(۴) متغیرهای جوشکاری به همراه کدگذاری نمونه ها و نیز ظاهر جوش ها ارائه شده است.



شکل 1-نمونه ابزار ساخته شده برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

2-2- نمونه برداری

پس از بررسی چشمی سطوح جوش تمامی نمونه های جوشکاری شده، نمونه برداری از جوش های با کیفیت مناسب، انجام پذیرفت. برشکاری نمونه‌ها جهت آماده سازی برای متالوگرافی از قسمت میانی جوشکاری‌ها تهیه شدند. طول نمونه‌هاطوری‌انتخاب‌شد که تمامی مناطق تحت تأثیر جوشکاری (Heat Affected Zone, Thermomechanically Affected Zone, Stir Zone) در آنها وجود داشته باشد. عرض نمونه‌ها نیز به اندازه ضخامت ورق بود.

2-3- آزمون ها

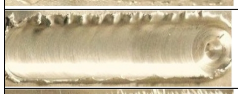
2-3-1- متالوگرافی

مراحل آماده سازی نمونه ها جهت متالوگرافی بترتیب زیر انجام گرفت:

در ابتدا نمونه ها در دمای ۱۵۰ درجه و مدت زمان ۲۰ دقیقه،تحت مانت گرم قرار گرفتند. سپس به وسیله سنباده با مش های ۸۰ –۱۶۰ – ۲۴۰ – ۴۰۰ – ۸۰۰ – ۱۲۰۰ – ۱۵۰۰– ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ سنباده شدند.پولیش نمونه ها به وسیله سوسپانسیون آلومینا انجام گرفت. سوسپانسیون‌های به کار رفته حاوی ذرات آلومینا با اندازه ۰/۵ میکرومتر بودند. حکاکی نمونه‌ها در یک مرحله صورت پذیرفت. بدلیل حرارت و کرنش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

جدول 4- وضعیت ظاهری و عیوب نمونه های مختلف.

کد نمونه	نوع عیب	سرعت چرخش ω(دور بر دقیقه)	سرعت پیشروی v(میلیمتر بر دقیقه)	ω/v(r/mm)	شکل ظاهری جوش
1(بدون لایه میانی)	بدون عیب	۸۰۰	۳۰	۲۶/۶	
1L(با لایه میانی)	بدون عیب	۸۰۰	۳۰	۲۶/۶	
2	بدون عیب	۸۰۰	۵۰	۱۶	
2L	بدون عیب	۸۰۰	۵۰	۱۶	
3	بدون عیب	۸۰۰	۱۰۰	۸	
3L	وجود حفره	۸۰۰	۱۰۰	۸	
4	بدون عیب	۱۲۰۰	۳۰	۴۰	
4L	وجود حفره	۱۲۰۰	۳۰	۴۰	
5	بدون عیب	۱۲۰۰	۵۰	۲۴	
5L	بدون عیب	۱۲۰۰	۵۰	۲۴	

بالای اعمال شده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ریزساختار در نمونه های جوشکاری شده پس از حکاکی بوسیله محلول حکاکی بخوبی مشخص نبود. به همین دلیل به منظور داشتن ریز ساختار واضح تر، نمونه ها مجددا توسط محلول ۲۲۵ cc HBF_4 + ۱۰۰ cc H_2O و در مدت زمان ۸۰ ثانیه حکاکی الکتریکی گردیدند.

آزمون متالوگرافی بر روی ریز ساختار اتصال و مناطق تحت تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و منطقه فصل مشترک اتصال در ناحیه اغتشاش در نزدیکی مرز اتصال AA7075–AA1050 از نظر اندازه دانه و قفل‌های مکانیکی انجام گردید. در این مرحله با استفاده از میکروسکوپ نوری OLYMPUS مدل BX-200 ساخت کشور ژاپن، ساختار دانه‌بندی و لایه‌ای نواحی مختلف جوش بررسی شد و ناحیه فصل مشترک اتصال در ناحیه اغتشاشی در نزدیکی مرز اتصال AA7075–AA1050 مورد بررسی قرار گرفته شد. لازم به ذکر است که به منظور محاسبه اندازه دانه ها، اندازه رسوبات و درصد حجمی رسوبات از نرم افزار Clemex استفاده شد.

2-3-2- میکروسکوپ الکترونی روبشی

جهت مطالعات ناحیه جوش از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA ساخت شرکت TESCAN جمهوری چک، مجهز به سیستم آنالیزگر عناصر[1](EDS) با ولتاژ کاری ۱۵kV استفاده گردید.

2-3-3- ریز سختی

سختی نمونه ها بر اساس استاندارد ASTM E384-16[9] و

1- Electron Dispersive Spectrum

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

جدول 5- مشخصات کلی دانه بندی نمونه های مختلف.

کد نمونه ها	ω/v(r/mm)	درصد حجمی فاز $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$	متوسط اندازه فاز $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ (µm)	متوسط اندازه دانه ها در منطقه اغتشاش (µm)
1(بدون لایه میانی)	۲۶/۶	۳/۳	۳/۶	۱۴
1L(با لایه میانی)	۲۶/۶	۳/۷	۳/۲	۱۰
2	۱۶	۲/۴	۲/۷	۸
2L	۱۶	۱/۸	۲/۹	۵
3	۸	۱/۷	۳/۳	۱۵
3L	۸	۳/۷	۳/۲	۱۱
4	۴۰	۱/۰	۲/۹	۱۶
4L	۴۰	۱/۵	۲/۵	۱۳
5	۲۴	۳/۴	۳/۶	۱۴
5L	۲۴	۲/۲	۴/۱	۸

جدول 6- آنالیز EDSاز نقطه های A، Bو Cمربوط به شکل 4-د.

عنصر	Al	Cr	Mn	Fe	Mg	Zn	Cu	Si	فاز احتمالی
A(درصد وزنی)	۹۴/۱۳	--	--	--	۱/۰۷	۴/۸۰	--	--	آلومینیوم 7075
B (درصدوزنی)	۹۹/۹	--	--	--	--	--	--	۰/۰۱	آلومینیوم1050
C (درصداتمی)	۷۵/۳۴	۲/۶۴	۱/۶۶	۱۲/۱۲	--	--	/۷۸ ۰	۷/۴۷	فاز $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$

به وسیله دستگاه ریزسختی سنجی (ویکرز) مدلPEA، ساخت کشور استرالیا با نیروی ۱۰۰ گرم به مدت ۱۰ ثانیه اندازه گیری شدند. اندازه گیری ریز سختی در طول ۱۸ میلی متر از سطح مقطع اتصال انجام شد به طوری که ریز سختی سنجی از یک سمت فلز پایه آغاز و پس از عبور از مناطق سه گانه اتصال به طرف مقابل می‌رسد. ریز سختی سنجی با استفاده از بار ۱۰۰گرم انجام شد. فاصله هر اثر سختی از اثر قبلی ۱میلیمتر بود.

2-3-4- کشش

برای بررسی استحکام کششی باید جوش‌ها را تحت آزمون کششی عرضی قرار داد. برای تهیه نمونه‌های آزمون کشش، نمونه‌های جوشکاری‌شده بر اساس استانداردASTM-E8M [10] برش داده شدند. تعداد کل جوش های قابل قبول جهت انجام آزمون کشش ۱۰ عدد بود که ۵ عدد آنها با لایه واسط و بقیه بدون لایه واسط بودند. از هر جوش دو نمونه جهت انجام آزمون کششی عرضی استخراج گردید.

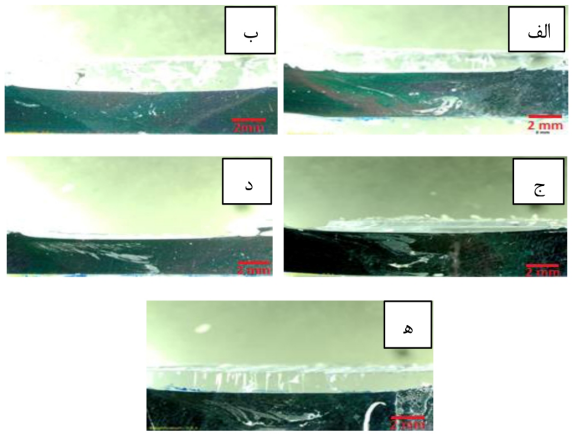
آزمون استحکام کششی توسط دستگاه INTRON – 5500R با نرخ حرکت فک ۱ میلیمتر بر دقیقه انجام گردید.

3- نتایج و بحث

اتصال های مختلفی، با تغییر متغیرهای جوشکاری انجام شد و ظاهر کلیه اتصال ها مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر گرفته شده از ظاهر کلیه جوش ها در شرایط مختلف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در جدول(۴) ارائه شده است.همانطور که در جدول(۴) مشاهده می شود ظاهر تمامی جوش های سالم برای دو حالت با و بدون استفاده از لایه میانی AA7075کاملا مطلوب می باشد. میزان پلیسه های ایجاد شده در حین جوشکاری در حد قابل قبول بود. عرض گرده جوش نیز مطابق با قطر شانه ابزار بدست آمد. ذکر این نکته حایز اهمیت است که استفاده از شانه مقعر سبب کاهش پلیسه ایجاد شده در جوش می شود. این در حالی است که استفاده از شانه مسطح بدلیل اینکه قادر به حفظ جریان ماده نمی باشد در نتیجه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

موجب افزایش مقدار پلیسه در جوش می گردد[۱۱].
شکل(۲)تصاویر ماکروسکوپی از مقاطع جوش های دارای لایه میانی AA7075 را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، سیلان مواد باعث مخلوط شدن دو ماده در ناحیه اغتشاشی جوش گردیده است.



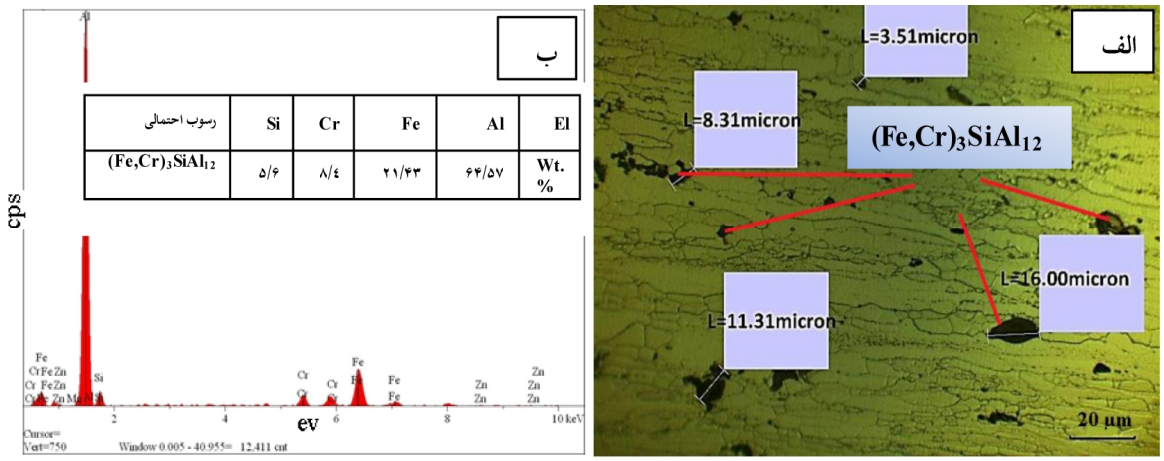
شکل2- تصاویر ماکروسکوپی از مقطع جوش نمونه های:
الف)L1، ب)L2، ج)L3، د)L4،ه)L5.

در شکل(۳) ریز ساختار اولیه ورق های AA7075حاصل از میکروسکوپی نوری نشان داده شده است. اندازه دانه های آلیاژ آلومینیوم AA7075 با دانه های هم محور بین ۸ تا ۱۴میکرومتر بودند. همچنین اندازه ترکیبات بین فلزی نامحلول مشاهده شده در حالت بیشینه، ۳۵ میکرومتر با درصد حجمی ۲/۸۶ درصد گزارش شد. این رسوبات با توجه به درصد وزنی عناصر حاصله آنالیز EDS از نوع $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ بودند. پس از انجام فرایند جوشکاری روی نمونه ها،متوسط اندازه دانه ها در منطقه اغتشاش و نیز متوسط اندازه و درصد حجمی رسوب $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$اندازه گیری شد که در جدول(۵) ارائه شده است.در شکل(۴) تصاویر میکروسکوپی نمونه های 1و 1Lنشان داده شده است. همانطور که در تصاویر میکروسکوپی نوری پیداست در نمونه با لایه واسط به دلیل وجود این لایه از رشد دانه ها جلوگیری شده است. حضور لایه واسط منجر به افزایش کسر حجمی رسوبات و کاهش اندازه انها شده است. نتایج کمی این تغییرات در جدول(۵) ارائه شده است. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مناطق مختلف جوش در نمونه 1Lدر شکل(۴- د) و آنالیز عنصری مربوط به آن در جدول(۶) ارائه شده است.آنالیز نقطه C دارای آلومینیوم بعلاوه آهن، کروم و سیلیسیوم می باشد در نتیجه آنالیز این نقطه نشان می دهد که این ذرات که با رنگ خاکستری روشن در منطقه اختلاط جوش ظاهر شده اند، رسوباتی از نوع $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$در ناحیه اغتشاش می باشند.

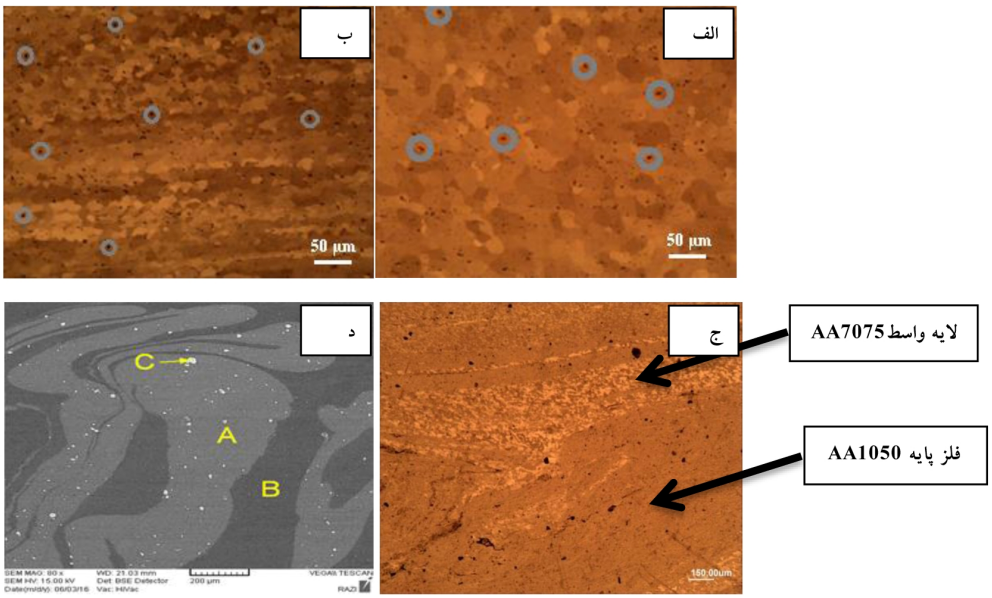
در شکل(۵) تصاویر میکروسکوپی نمونه های 2و 2Lنشان داده شده است. همانطور که در تصاویر میکروسکوپی نوری پیداست در این نمونه هم لایه واسط از رشد دانه ها جلوگیری کرده است. حضور لایه واسط در این شرایط برخلاف نمونه 1و 1Lمنجر به افزایش اندازه رسوبات و کاهش درصد حجمی رسوبات $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$شده است. این تغییرات درحالیست که در نمونه های 3 و 3L حضور لایه واسط مجددا تغییرات اندازه دانه را کنترل کرده و منجر به کاهش در اندازه دانه ها شده است. برخلاف نمونه های 2 و 2L، حضور لایه واسط در نمونه های 3و 3Lمنجر به کاهش اندازه و افزایش کسر حجمی رسوبات $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$شده است.با وجود اینکه نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی در نمونه 3با مقدار عددی ω/v=۸ دور بر میلیمتر، کمتر از سایر نمونه ها است و در نتیجه کمترین حرارت ورودی را دارد، بنابراین انتظار می رود که دارای کوچکترین اندازه دانه باشد در حالیکه این چنین نبوده، بطوریکه متوسط اندازه دانه در منطقه اغتشاش در این نمونه برابر ۱۵ میکرومتر بود که این مقدار دو برابر متوسط اندازه دانه در منطقه اغتشاش در نمونه 2 با نسبت ω/v=۱۶ دور بر میلیمتر می باشد. بنابراین می توان این چنین اظهار داشت که بر اثر بالا بودن بیش از حد سرعت پیشروی نسبت به سرعت چرخشی در نمونه 3، ابزار فرصت کافی برای هم زدن و ایجاد اغتشاش در جوش را نداشته است.

این امر بستر مناسبی برای ایجاد حفرات در پشت ابزار به علت عدم پلاستیسیته کافی مواد، حین پیشروی فراهم آورده است. در شکل(۶) تصاویر میکروسکوپی نوری مناطق مختلف جوش نمونه های 3و 3L نشان داده شده است. شکل(۶- د) وجود حفره در این منطقه را نشان می دهد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]



شکل3- تصاویر میکروسکوپی نوری از ریز ساختار اولیه ورق های: الف) **AA7075**و ب) آنالیز **EDS**رسوبات در آلومینیوم 7075.

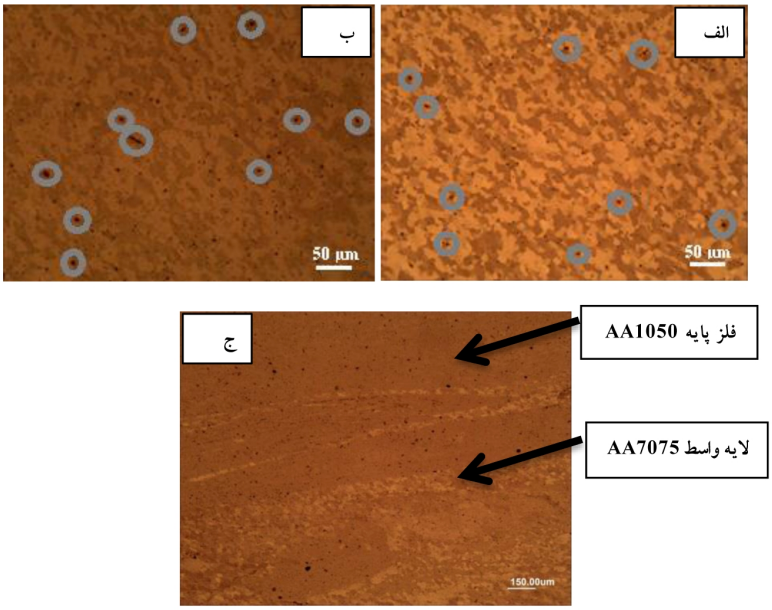


شکل 4- تصاویر الف) ناحیه اغتشاش نمونه 1، ب) ناحیه اغتشاش نمونه **L1**، ج)نواحی لایه ای نمونه **L1**و د) **SEM**از نمونه **L1**.

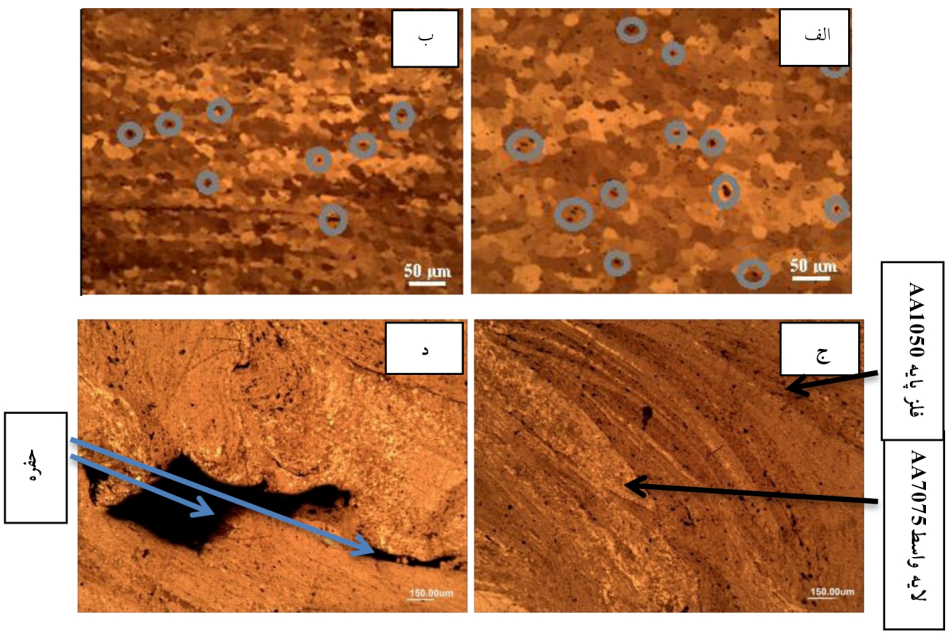
در شکل(۷) تصاویر میکروسکوپی نوری منطقه اغتشاش نمونه ای 4و 4Lنشان داده شده است. حضور لایه واسط منجر به کاهش اندازه دانه ها شده است. حضور لایه واسط، کاهش اندازه رسوبات $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ و افزایش کسر حجمی آن ها را درپی داشت. اندازه دانه‌ها در ناحیه اغتشاش نمونه 4، با متوسط اندازه دانه ۱۶ میکرومتر، بزرگتر از اندازه دانه در سایر نمونه‌ها است و به عبارتی در این نمونه به علت بالا بودن نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی ۴۰= ω/v دور بر میلیمتر، در میان نمونه های مورد قبول، حرارت ورودی بیشتری درون جـوش ایجـاد شده، لـذا گـذشت زمان بیشترجهت خنک شدن، فرصت مناسب برای رشد دانه ها را فراهم کرده است. از طرفی این حرارت ورودی بالا نیز منجر به ایجاد جریان ناآرام و نرم شدن بیش از حد مواد می گردد که موجب عدم اختلاط مناسب مواد می شود. این جریان ناآرام و دمای بالا باعث بوجود آمدن حفرات در منطقه اغتشاش می گردد[۱۲].

در شکل(۸) تصاویر میکروسکوپی نوری از منطقه اغتشاش نمونه های 5و 5Lنشان داده شده است.همانطور که در تصاویر پیداست وجود لایه واسط باعث کاهش تقریبا ۵۰ درصدی اندازه دانه ها گشته است. رسوبات $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$در مقایسه با نمونه های 4 و 4Lدر حضور لایه واسط، رفتار متفـاوتی نشان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]



شکل 5- تصویر الف) ناحیه اغتشاش نمونه 2، ب) ناحیه اغتشاش نمونه 2L، ج)نواحی لایه ای نمونه 2L.



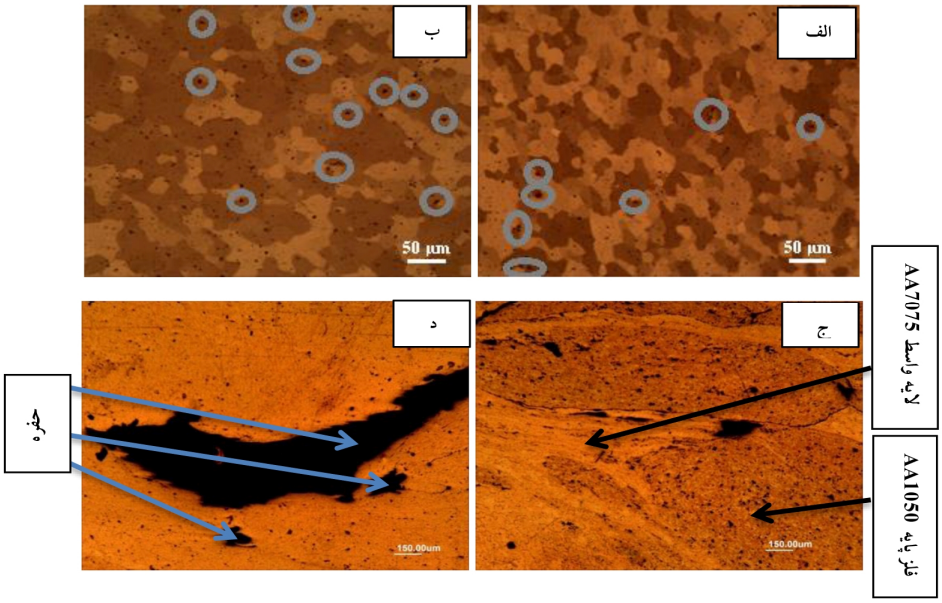
شکل 6- تصویر الف) ناحیه اغتشاش نمونه 3، ب) ناحیه اغتشاش نمونه 3L، ج)نواحی لایه ای نمونه 3Lو د)حفرات موجود در نمونه3L.

دادند. به این صورت که کسر حجمی آنها کاهش و متوسط اندازه آنها افزایش یافت.

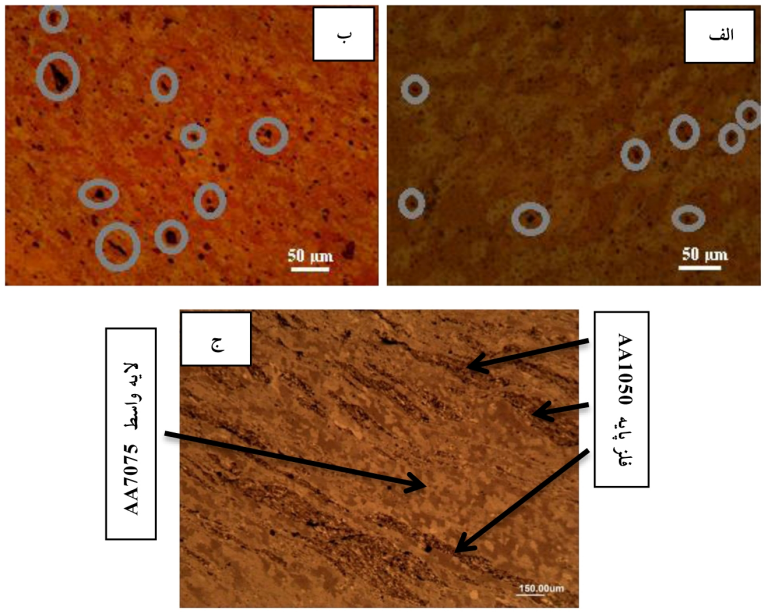
با افزایش نسبت سرعت چرخش به سرعت پیشروی علاوه بر افزایش حداکثر دمای تجربه شده، اغتشاش حاصله نیز افزایش می یابد. به عبارت دیگر مقدار کار مکانیکی اعمال شده افزایش می یابد که این امر می تواند موجب کاهش اندازه دانه در ناحیه اغتشاش شود. بنابراین حرارت ورودی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اثر دو گانه ای دارد و افزایش حرارت ورودی به معنی افزایش کار مکانیکی نیز هست. می توان نتیجه گرفت که عامل غالب در افزایش اندازه دانه در ناحیه اغتشاش با افزایش حرارت ورودی، عامل افزایش دمای بیشینه است[۱۳].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سرعت چرخش بالاتر یا سرعت پیشروی پایین تر منجر به افزایش مقدار تغییر شکل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]



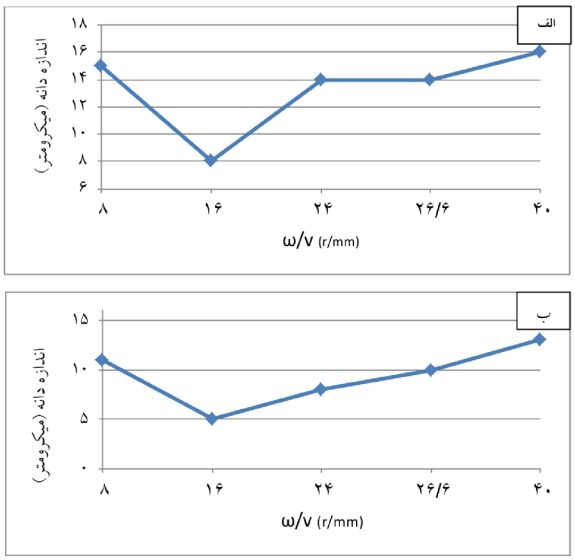
شکل 7- تصویر الف) ناحیه اغتشاش نمونه 4، ب) ناحیه اغتشاش نمونه 4L، ج)نواحی لایه ای نمونه 4Lو د)حفرات موجود در نمونه4L.



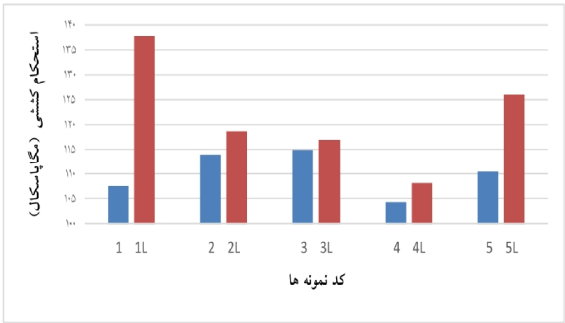
شکل 8- تصویر الف) ناحیه اغتشاش نمونه 5، ب) ناحیه اغتشاش نمونه 5L، ج)نواحی لایه ای نمونه 5L.

پلاستیکی و افزایش دمای بیشینه در حین چرخه حرارتی فرایند می شود. افزایش در مقدار تغییر شکل منجر به کاهش در اندازه دانه تبلور مجدد یافته می شود، و هم چنین افزایش دما منجر به رشد دانه قابل ملاحظه می گردد. بنابراین تغییر اندازه دانه تبلور مجدد یافته در جوشکاری اصطکاکی اغتشاش بستگی به این دارد که کدام مکانیزم عامل غالب است [۱۴]. جانا و همکارانش [۱۵] بیان نمودند که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ ریختگی آلومینیوم در سرعت چرخشـــی ثابت با افزایش سرعت پیشروی بدلیل کاهش حرارت ورودی، تبلور مجدد بصورت بهتری صورت گرفته و در نتیجه اندازه دانه کاهش می یابد. همچنین لی و همکارانش [۱۶] طی تحقیق بر روی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیر هم جنس آلیاژهای آلومینیوم این نکته را اظهار نمودند که در سرعت پیشروی ثابت با بالا رفتن سرعت چرخشی اندازه دانه افزایش می یابد.باتوجه به نتایج بدست آمده در شکل(۹) با افزایش نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی از ۱۶ دور بر میلیمتر به ۴۰ دور بر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]



شکل 9- رابطه متوسط اندازه دانه با نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی در نمونه های جوشکاری شده: الف) بدون استفاده از لایه میانی AA7075 ب) با استفاده از لایه میانی AA7075.



شکل10- مقایسه استحکام کششی نمونه های جوشکاری شده با و بدون استفاده از لایه میانی به روش اصطکاکی اغتشاشی.

میلیمتر، و متعاقب آن افزایش حرارت ورودی، اندازه دانه ها در منطقه اغتشاش افزایش یافته است در نتیجه به نظر می رسد مکانیزم غالب در تغییر اندازه دانه ناحیه اغتشاش، مکانیزم افزایش حرارت ورودی است. بطوریکه با افزایش دما در اثر افزایش نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی، اندازه دانه های تبلور مجدد یافته در ناحیه اغتشاش افزایش یافته است. همانطور که در شکل(۹) مشاهده می‌شود اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی بر اثر تغییر نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی دچار تغییر شده است. نواحی مرکزی تمامی جوش ها اثرات واضحی از اغتشاش را نشان می‌دهند. این مطلب را می‌توان به رخ دادن تبلور مجدد دینامیکی در منطقه اغتشاش نسبت داد، بدان معنی که تبلور مجدد دینامیکی سبب ریز شدن دانه ها شده است[۱۷].

3-1- بررسی خواص مکانیکی

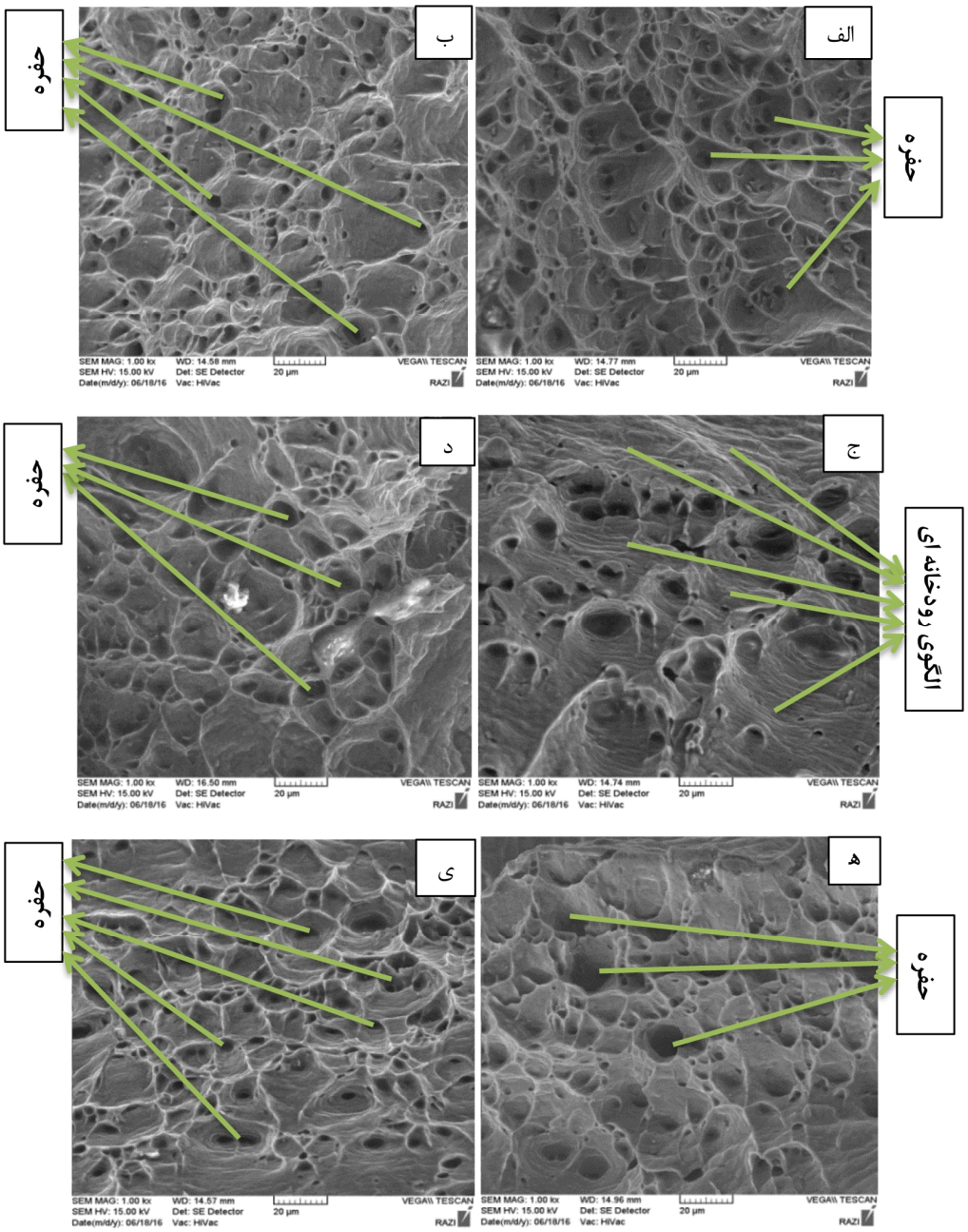
3-1-1- کشش

پس از بررسی و مطالعه ریز ساختار منطقه اتصال و تحولات رخ داده در آن استحکام اتصالات ایجاد شده در شرایط مختلف به منظور مقایسه تأثیر متغیرها ارزیابی گردید. در آزمون استحکام کششی، تمامی نمونه ها از ناحیه جوش شکسته شدند، شروع انفصال در نمونه های جوشکاری شده بدون لایه میانی AA7075 از سمت پیشرونده جوش و در نمونه های جوشکاری‌شده با استفاده از لایه میانی AA7075از سمت پسرونده جوش بود.نکته قابل توجه این است که در تمامی نمونه های جوشکاری شده با استفاده از لایه میانی AA7075بر خلاف نمونه های جوشکاری شده بدون استفاده از لایه میانی AA7075که همگی آنها از سمت پیشرونده دچار شکست شدند، در این نمونه ها شکست از سمت پسرونده اتفاق افتاد که می توان دلیل این رخداد را تمرکز بیشتر لایه میانی AA7075در سمت پیشرونده دانست زیرا در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر اثر هم جهت بودن چرخش و پیشروی ابزار در سمت پیشرونده، حرارت در این ناحیه افزایش یافته و موجب نرم شدن و سیلان بیشتر مواد می شود. در نتیجه لایه میانی AA7075بیشتر به سمت پیشرونده کشیده شده و موجب تقویت بیشتر این ناحیه نسبت به سمت پسرونده شده است. بنابراین طی آزمون کشش بر اثر کشیده شدن، نمونه‌ها از سمت پسرونده که استحکام کمتری دارند دچار شکست شدند.در جدول (۷)نتایج آزمون کشش نمونه ها ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، بهترین نمونه در بین نمونه‌های جوشکاری شده با و بدون استفاده از لایه میانی AA7075از لحاظ داشتن نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی بهینه، بترتیب نمونه 2(سرعت چرخشی ۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰میلی متر در دقیقه) و نمونه 1L(سرعت چرخشی ۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

۳۰ میلی‌متر در دقیقه) می‌باشد.مطابق شکل(۱۰) در نمونه های جوشکاری شده بدون لایه میانی AA7075در تمامی ستون ها با بالا رفتن نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی بدلیل میزان بالای حرارت ورودی تولید شده و درشت تر شدن اندازه دانه های فلز AA1050 در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، استحکام کششی نمونه ها کاهش یافته است. بطوریکه بالاترین استحکام کششی مربوط به نمونه 2با مقدار ۱۱۶/۸ مگاپاسکال و با نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی ۱۶ = ω/vدور بر میلیمتر و کمترین استحکام کششی مربوط به نمونه 4با مقدار ۱۰۴/۵مگاپاسکال و با بالاترین نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی۴۰ = ω/vدور بر میلیمتر می باشد.

مشابه نتایج بدست آمده از آزمون سختی برای نمونه های جوشکاری شده بدون استفاده از لایه میانی AA7075، در آزمون کششی نیز در نمونه 3با وجود داشتن پایین ترین نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی ۸ = ω/vدور بر میلیمتر، بدلیل عدم اغتشاش مناسب در منطقه اتصال که ناشی ازسرعت پیشروی بالا (۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه) می باشد، کمترین استحکام



شکل11- تصاویر سطح شکست در نمونه های: الف)L1، ب)L1، ج)L3، د)L3، ه)L4 و ی)L4.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

جدول 7- نتایج آزمون کشش نمونه‌های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی.

نمونه	استحکام کششی (N/mm^2)	درصد ازدیاد طول	محل شکست
1	۱۰۷/۵	۹/۲	ناحیه جوش(پیشرونده)
1L	۱۳۷/۷	۷/۴	ناحیه جوش (پسرونده)
2	۱۱۴/۱	۹/۲	ناحیه جوش (پیشرونده)
2L	۱۱۸/۷	۶/۶	ناحیه جوش (پسرونده)
3	۱۱۴/۸	۹/۴	ناحیه جوش (مرکز)
3L	۱۱۶/۸	۶/۱	ناحیه جوش (پسرونده)
4	۱۰۴/۴	۹/۶	ناحیه جوش (مرکز)
4L	۱۰۸/۱	۶/۲	ناحیه جوش (مرکز)
5	۱۱۰/۳	۹/۴	ناحیه جوش (پیشرونده)
5L	۱۲۶	۴/۶	ناحیه جوش (پسرونده)

جدول 8- ریزسختی نمونه ها.

نمونه	ω(rpm)	v (mm/min)	ω/v (r/mm)	ریزسختی منطقه جوش(Vickers)
1	۸۰۰	۳۰	۲۶/۶	۲۷/۷۵
1L	۸۰۰	۳۰	۲۶/۶	۵۷/۵۷
2	۸۰۰	۵۰	۱۶	۳۳/۰۳
2L	۸۰۰	۵۰	۱۶	۴۰/۵۸
3	۸۰۰	۱۰۰	۸	۲۷/۰۰
3L	۸۰۰	۱۰۰	۸	۳۹/۷۴
4	۱۲۰۰	۳۰	۴۰	۲۶/۲۴
4L	۱۲۰۰	۳۰	۴۰	۴۸/۵۸
5	۱۲۰۰	۵۰	۲۴	۲۸/۹۹
5L	۱۲۰۰	۵۰	۲۴	۵۰/۳۱

حاصل شد.از نمودارهای حاصل از این آزمون برای نمونه های دارای لایه میانی AA7075، که در شکل(۱۰) آورده شده‌اند چنین برمی‌آید که بر عکس نمونه های جوشکاری شده بدون لایه میانی AA7075که با افزایش نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی استحکام کششی در آنها کاهش می یافت، در این حالت (نمونه های دارای لایه میانی) با افزایش نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی، بدلیل افزایش حرارت ورودی و نرم شدن مواد، اختلاط لایه میانی AA7075با فلز AA1050بطور بهتری صورت گرفته است و در نتیجه موجب تقویت منطقه جوش شده است. وقتی که اختلاط در ناحیه جوش بیشتر باشد، قفل‌های مکانیکی ایجاد شده در جوش بیشتر می‌شود و این قفل‌ها در هنگام کشیدگی نمونه مانع بیشتر می‌شود و این قفل‌ها در هنگام کشیدگی نمونه مانع از هم گسستگی جوش می‌شوند و استحکام آن را بالا می‌برند[۱۴]. در اینجا نیز مانند نتایج نشان داده شده در آزمون سختی، در نمونه 4Lبدلیل افزایش بیش از حد نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی ω/v = ۴۰دور بر میلیمتر، جریان نا آرام بوجود آمده و اختلاط لایه میانی AA7075 با فلز AA1050 بطور مناسبی صورت نگرفته و موجب ایجاد حفره در ناحیه اغتشاشی (در شکل ۷- د به آن پرداخته شد)، گردیده که مکان های مناسبی برای شروع و اشاعه ترک می باشند و در نتیجه استحکام کششی منطقه جوش کاهش یافته است. در نمونه 3Lنیز بدلیل اختلاط و سیلان کم مواد بر اثر پایین بودن بیش از حد حرارت ورودی ω/v = ۸ دور بر میلیمتر، در منطقه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

اغتشاش حفره ایجاد شده (در شکل(۶- د) مورد بررسی قرار گرفت)، که سبب کاهش یافتن استحکام کششی گردیده است. در این تحقیق بیشترین استحکام جوش زمانی بدست آمد که نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی۲۶/۶ = ω/vدور بر میلیمتر، و متعلق به نمونه 1Lبود.علاوه بر این در نمونه های 3Lو 4Lنیز با وجود داشتن حفره در سمت پیشرونده، شکست در طرف پسرونده رخ داد و این اتفاق می تواند بیانگر این نکته باشد که توزیع بیشتر لایه میانی AA7075در سمت پیشرونده تمامی نمونه ها حتی در نمونه های دارای حفره نیز موجب بالا رفتن استحکام گردیده است. همچنین در مقایسه بین نمونه های با و بدون لایه میانی AA7075در شکل(۱۰)، در تمامی حالات نمونه هایی که با استفاده از لایه میانی AA7075جوشکاری شدند دارای استحکام کششی بالاتری بودند.

3-1-2- بررسی سطح شکست

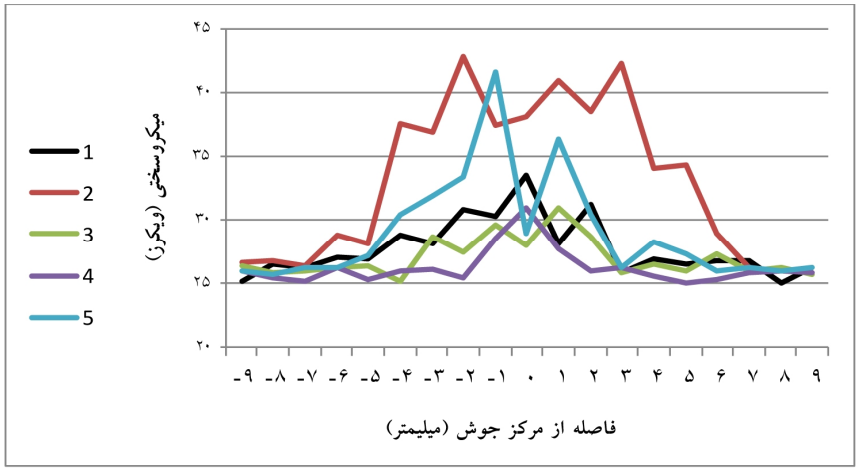
برای بررسی بهتر چگونگی شکست نمونه ها از ناحیه جوش، سطح شکست نمونه های (1و 1L)، (3و 3L)و (4و 4L) که بترتیب دارای بهترین، پایین ترین و بالاترین نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی بودند مورد مطالعه قرار گرفت. تصاویری از سطح شکست در شکل(۱۱)، آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود در سطح شکست تمامی نمونه ها حفره های ریز به چشم می خورد. در شکل(۱۱- ج) بر روی سطح شکست، الگوهای رودخانه ای[1] مشاهده می شود که نشان از شکست بصورت ترد ورقه ای دارد که می توان آنرا به پایین‌ترین نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی که موجب اغتشاش نامناسب در ناحیه اتصال می شود، نسبت داد. از طرف دیگر، سطح شکست دیگر نمونه ها دارای دیمپل های عمیق و زیادی می باشد که از مشخصه های بارز شکست نرم می باشد و همچنین نشان دهنده تغییر شکل زیادی در حین آزمون کشش می باشد. در نتیجه با توجه به شکل(۱۱) می توان گفت در نمونه های 1، 1L، 3L، 4، 4L شکست بصورت نرم بوده و تنها در نمونه 3شکست از نوع ترد بوده است.

1- River pattern

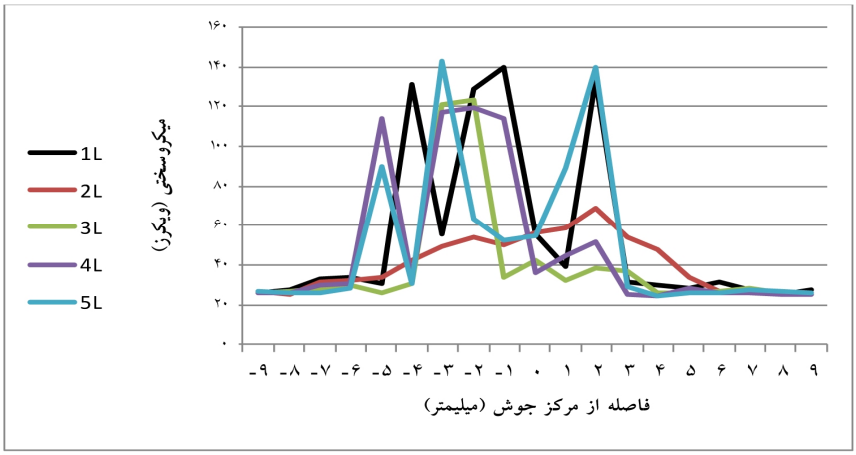
3-1-3- ریزسختی

سختی را می توان یک مقیاس نسبی از استحکام موضعی محسوب نمود، با این وجود، سختی نسبت به ناهمواری‌های سطحی و فازی حساس است.آزمون کشش یک آزمون مهم در کاربردهای مهندسی است، ولی این آزمون رابطه بین خواص ذاتی کششی و ریز ساختار موضعی را نشان نمی‌دهد، به همین دلیل از آزمون ریز سختی سنجی برای این منظور استفاده شد. در جدول(۸) ریزسختی نمونه های جوشکاری شده ارائه شده است. همانطور که در جدول مشاهده می شود بالاترین میزان سختی منطقه جوش در نمونه های بدون لایه واسط، مربوط به نمونه 2با مقدار ۳۳/۰۳ ویکرز و برای نمونه های با لایه واسط، مربوط به نمونه 1Lبا مقدار ۵۷/۵۷ بدست آمد. همچنین کمترین میزان سختی در نمونه های بدون لایه واسط، مربوط به نمونه 4با مقدار ۲۶/۲۴ ویکرز و برای نمونه های با لایه واسط، مربوط به نمونه 4L با مقدار ۳۹/۷۴ ویکرز می باشد.بدلیل وجود دو نوع آلیاژ در نمونه های جوشکاری شده با استفاده از لایه میانی و وجود ساختارهای متفاوت در نواحی مختلف جوش مقداری نوسان در میزان سختی وجود دارد. مطابق نمودارهای شکل های(۱۲ و ۱۳) ناحیه اغتشاشی که در بازه ۳- الی ۳+ میلی متر از مرکز جوش قرار دارد در تمامی نمونه ها، اعم از با لایه واسط و بدون لایه واسط، دارای بیشترین سختی است که این افزایش سختی به دلیل رخداد پدیده تبلور مجدد که منجر به کاهش اندازه دانه می شود، می باشد. زیرا هرچه دانه ریزتر باشد در نتیجه مرزهای بیشتری داشته و محدودیت بیشتری در مقابل حرکت نابجایی ها اعمال کرده و سبب افزایش سختی می‌شود[۳]. طبق نمودارهای شکل‌های(۱۲و۱۳) تفاوت آشکاری در مقدار سختی در دو طرف ناحیه اغتشاشی دیده نمی شود که دلیل آن عدم اختلاف زیاد اندازه دانه در دو طرف پین می باشد.در نمودارشکل(۱۴) ارتباط سختی منطقه جوش با نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی در نمونه‌های بدون لایه واسط نشان داده شده است. طبق این شکل، با بالا رفتن نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی از ۸ دور بر میلیمتر برای نمونه۳ به ۴۰ دور بر میلیمتر برای

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]



شکل 12- نمودار ریزسختی منطقه جوش در فاصله 2/5 میلی متر پایین تر از سطح جوش در نمونه های بدون لایه واسط، الف) نمونه های 1، 2، 3،4، 5.

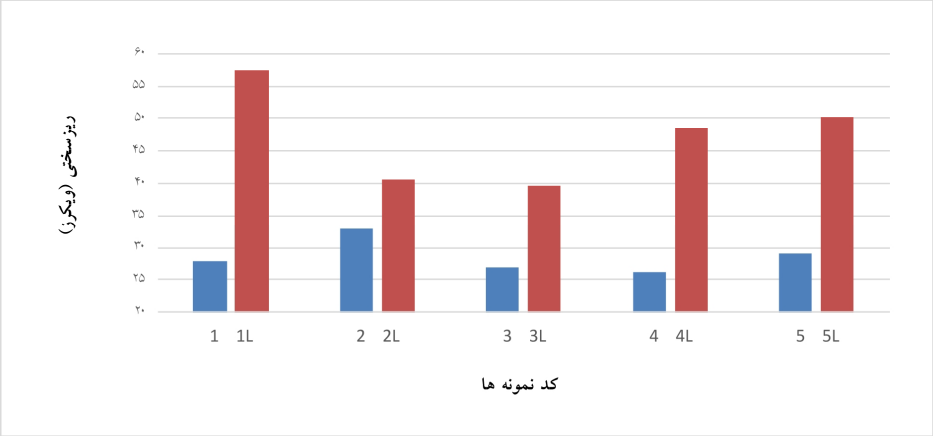


شکل 13- نمودار ریزسختی منطقه جوش در فاصله 2/5 میلی متر پایین تر از سطح جوش در نمونه های با لایه واسط، الف) نمونه های 1L، 2L، 3L،4L، 5L.

نمـونـه۴، به دلیل بالارفتن از ۸ دور بر میلیمتر برای نمـــونه۳ به ۴۰ دور بر میلیمتر برای نمـونـه۴، به دلیل بالارفتن حرارت ورودی و بزرگ شده دانه ها (که در نمودار شکل(۹) مورد بررسی قرار گرفت)، مقدار سختی کاهش پیدا کرد. اما در نمونه 3با وجود داشتن کمترین نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی با مقدار ω/v=۸ دور بر میلیمتر، انتظار می رود که بالاترین مقدار سختی را دارا باشد در حالی که تقریبا کمترین میزان سختی معادل ۲۷ ویکرز، متعلق به این نمونه می باشد. بنابراین می توان دلیل آن را به پایین بودن بیش از حد نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی نسبت داد بطوریکه بدلیل سرعت بالای پیشروی ابزار نسبت به پایین بودن سرعت چرخشی، ابزار فرصت کافی برای هم زدن و ایجاد اغتشاش در نمونه را نداشته است. بنابراین پدیده تبلور مجدد بطور کامل رخ نداده و در نتیجه سختی افزایش چندانی نیافته است.

همچنین در نمونه۴ بدلیل افزایش بیش از حد نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی با مقدار۴۰ = ω/vدور بر میلیمتر، حرارت ورودی بالا رفته و سبب رشد دانه (که در نمودار شکل(۹) مورد بررسی قرار گرفت)، و در نتیجه کاهش مقدار سختی شده است. نتایج نشان می دهد زمانیکه نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی ۱۶ باشد یعنی در نمونه۲، حرارت ورودی مقدار بهینه ای به منظور ایجاد اغتشاش مناسب وکاهش اندازه دانه در منطقه جوش را دارد. در نتیجه دارای بالاترین مقدار سختی با مقدار ۳۳ ویکرز در بین نمونه های جوشکاری شده بدون استفاده از لایه میانی AA7075 می باشد.با افـزایش مقدار نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی، اندازه دانه طبق نمودار شکل(۹) در ناحیه اغتشاش افزایش می یابد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]



شکل14- مقایسه مقدار سختی منطقه جوش در نمونه های جوشکاری شده با و بدون استفاده از لایه میانی AA7075 به روش اصطکاکی اغتشاشی.

نمودارهای آزمون سختی از نمونه های جوشکاری شده با استفاده از لایه میانی در شکل(۱۴) نشان داده شده است.مطابق نمودار شکل(۱۴)، مشخص گردید که با افزایش نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی بر اثر بالا رفتن حرارت ورودی نرم شدن مواد افزایش یافته در نتیجه اختلاط بهتری صورت گرفته است بطوریکه توزیع بیشتری از لایه میانی AA7075 در مرکز جوش صورت می گیرد که موجب افزایش سختی در ناحیه اغتشاش شده است.

پراکندگی مقادیر سختی در ناحیه اغتشاشی می‌تواند به تشکیل الگوهای حلقه پیازی مربوط باشد. در ناحیه اغتشاشی نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از لایه میانی AA7075، بعضی مقادیر سختی بسیار بالا، بیش از ۱۳۰ویکرز مشاهده می‌شود که مقدار بالای سختی در این نواحی مربوط به لایه میانی AA7075 تبلور مجدد یافته هستند که بطور ذاتی دارای مقدار سختی بالاتری نسبت به AA1050می باشد.

در واقع در بعضی نواحی، لایه میانی AA7075تا نزدیکی سطح جوش کشیده شده است. همانطور که در نمودارهای شکل(۱۴) نشان داده شده است نمونه های 1L با نسبت ω/v = ۲۶/۶ دور بر میلیمتر بدلیل دارا بودن حرارت ورودی کافی که ناشی از نسبت بهینه سرعت چرخشی به سرعت پیشروی می باشد، دارای بیشترین مقدار سختی با مقدار ۵۷/۵۷ ویکرز می باشد، زیرا مقـــدار بیشتری از لایه میانی AA7075 در منطقه اغتشـاش دچـار اختلاط گردیده و در نتیجه آن سختی افزایش می‌یابد.

از طرف دیگر در نمونه 4Lبا وجود اینکه با نسبت سرعت چرخشی به سرعت خطی ω/v = ۴۰دور بر میلیمتر که حدودا ۱/۵ برابر حالت بهینه ω/vمی باشد، دارای بالاترین میزان حرارت ورودی می باشد و انتظار می رود که بالاترین سختی را در بین تمامی نمونه ها دارا باشد اما اینگونه نیست و از آنجاییکه حرارت ورودی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باید مقدار بهینه ای باشد یعنی نه بیش از حد بالا و نه بیش از پایین باشد

در نتیجه در نمونه 4L بدلیل بالا بودن بیش از حد نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی، حرارت ورودی بسیار افزایش یافته و موجب برقراری جریان نا آرام و اختلاط نامناسب مواد شده است طوریکه لایه میانی AA7075 بصورت نامطلوب در مرکز جوش پخش شده است. علاوه بر این در نمونه 3L نیز بدلیل پایین بودن بیش از حد نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی ω/v = ۸ دور بر میلیمتر، حرارت ورودی بسیار کاهش یافته که موجب عدم نرم شدن مواد و در نتیجه اختلاط ناچیز لایه میانی AA7075 با فلز AA1050 شده است بطوریکه دارای کمترین میزان سختی با مقدار ۳۸ ویکرز در بین تمامی نمونه ها می باشد.

همچنین نمودار میانگین تغییرات ریزسختی در منطقه جوش در شکل(۱۴) نشانگر این است که بیشترین مقدار سختی مربوط به نمونه 1L با مقدار ۵۷/۵۷ ویکرز و کمترین مقدار سختی متعلق به نمونه 3L با مقدار ۳۹ ویکرز بود. این نمودار نشان می‌دهد که در تمامی نمونه ها بجز نمونه 4L افزایش نسبت سرعت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

چرخشی به سرعت پیشروی موجب افزایش سختی گردیده است.علاوه بر این نتایج حاصل از نمودار شکل(۱۴)حاکی از آنست که در مقایسه میزان سختی بین نمونه‌های جوشکاری شده با و بدون استفاده از لایه میانی، در تمامی حالات نمونه‌های دارای لایه میانی دارای مقدار سختی بالاتری می‌باشند و این بدان معنا می باشد که استفاده از لایه میانی AA7075 سبب بالا رفتن مقدار سختی نمونه های جوشکاری شده گردیده است.

4- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر امکان سنجی استفاده از لایه واسط از جنس آلیاژ آلومینیوم 7075در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم خالص تجاری 1050بررسی و نتایج زیر حاصل شد:

استفاده از لایه واسط از جنس آلیاژ آلومینیوم 7075 باعث (بهبود) افزایش خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم خالص تجاری 1050 می گردد.

کوچکترین اندازه دانه ها در منطقه اغتشاش در نمونه های بدون لایه واسط، مربوط به نمونه 2با نسبت۱۶ = ω/v دور بر میلیمتر، و اندازه دانه ۸ میکرومتر می باشد. همچنین این مقدار در نمونه های با لایه واسط، مربوط به نمونه 2L با نسبت ۱۶ = ω/vدور بر میلیمتر، و مقدار ۵ میکرومتر می باشد.

بیشترین مقدار سختی در منطقه اتصال در نمونه های بدون لایه واسط مربوط به نمونه 2با نسبت ۱۶= ω/vدور بر میلیمتر، به مقدار ۳۳/۰۳ ویکرز و بیشترین مقدار سختی در منطقه جوش در نمونه های با لایه واسط مربوط به نمونه 1Lبا نسبت ۲۶/۶ = ω/vدور بر میلیمتر، به مقدار ۵۷/۵۷ ویکرز می باشد.

بیشترین مقدار استحکام کششی در نمونه های بدون لایه واسط مربوط به نمونه 2با نسبت۱۶= ω/v دور بر میلیمتر، به مقدار ۱۱۶/۸ نیوتن بر متر مربع و بیشترین مقدار استحکام کششی در نمونه های با لایه واسط مربوط به نمونه 1Lبا نسبت۲۶/۶=ω/v دور بر میلیمتر، به مقدار ۱۳۷/۷ نیوتن بر متر مربع می باشد.

نتایج آزمون استحکام کششی و ریزسختی نشان می دهد که یک ترکیب بهینه از سرعت چرخش و سرعت پیشروی وجود دارد که در آن استحکام کششی و ریزسختی بیشینه است. سرعت چرخشی ۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰ میلی متر در دقیقه در نمونه های بدون لایه میانی و سرعت چرخشی ۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۳۰ میلی متر در دقیقه در نمونه های دارای لایه میانی، بهترین نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی بودند.

کسر حجمی و اندازه رسوبات$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$تحت تاثیر حضور لایه واسط، سرعت چرخشی و سرعت پیشروی تغییر می کند.

منابع

1- Zhang Y., Sato Y.S., Kokawa H., C. Park S.H., Hirano S,"Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Ti–6Al–4V Friction Stir Welds", *Materials Science and Engineering A* Vol. 485, pp 448–455,2008.

2- MishraaR.S. and Ma Z.Y.,"Friction Stir Welding and Processing", *Materials Science and Engineering* A, Vol. 50, pp 1–78,2005.

3- Byung-Wook, A.H.N., Don-Hyun, C., Yong-Hwan, K., Seung-Boo,J., "Fabrication of SiCp/AA5083 Composite via Friction Stir Welding",School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University, 2012.

4- کربلایی حسینی.، م.، قنبری، ا.، ثابت، ح.، "جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم با نانوپودر تقویت کننده آلومینا"،چهاردهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی،۱۳۹۲.

۵- روزبهانی، ر.، ثابت، ح.، کوکبی، ا.، "بررسی اثر محیط خنک کننده بر ریزساختار اتصال آلیاژآلومینیوم7075-T6 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی"، چهاردهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی،۱۳۹۲.

6-Sabari Sree, S., Malarvizhi, S., Balasubramanian, V., "Characteristics of FSW and UWFSW Joints of AA2519-T87 Aluminium Alloy: Effect of Tool Rotation Speed", *Journal of Manufacturing Processes*, 22, pp. 278-289,2016.

۷- ثابت، ح.، صادقی، م.، محمدی خواه، م.، میرزامحمد. ن.، خلیلی. م.، "اثر متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب (UFSW) بریزساختار و ویژگیهای مکانیکی جوش آلیاژ آلومینیوم۴۳۴۳"، مجله مواد نوین، جلد۲، شماره۱۳۹۰،۱.

8-Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry, ASTM E1251-11.

9-Standard Test Method for Microindentation Hardness

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

of Materials**,** ASTM E384-16**.**
10-Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM-E8M.
11-Schmide H., Hattel J, "A local Model for the Thermomechanical Conditions in Friction Stir Welding", *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering A*, Vol.13, pp 77-93,2005.
12-Zaman Khan ,N., Noor Siddiquee ,A., Khan Zahid , A., Shihab Suha, K., "Investigations on Tunneling and Kissing Bond Defects in FSW Joints for Dissimilar Aluminum Alloys",*Journal of Alloys and Compounds*, 2015.
13-Kim Y.G., Fajii H., Tsumura T., komazaki T., Nakata. K, "Three Defect Types in Friction Stir Welding of Aluminuim Die Casting Alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol 415, pp 250-254, 2005.
14- Cho J.H., Boyce D.E., Dawson P.R, "Modelling of Strain Hardening During Friction Stir Welding of Stainless Steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol.398, pp 146-163,2005.
15- Janaa.S, Mishraa.R.S, Baumannb.J.A, Grant.G, "Effect of Process Parameters on Abnormal Grain Growth during Friction Stir Processing of a Cast Al AlloyMaterials", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, PP 189–199,2010.
16- Li.Y, Murr.L.E, McClure.J.C,"Flow Visualization and Residual Microstructures Associated with the Friction Stir Welding of 2024 Aluminum to 6061 Aluminum", *Materials Science and Engineering A*, Vol.271, PP 213–223,1999.
17-Doherty R.D., Hugher P.A., Humphreys F.J., Jonas J.J., Juul Jensen D., Kassner M.E, King W.E., McNelley T.R. , McQuenn H.J., Rollett A.D, "Current Issues in Recrystallization: a Review", *Material Science and Engineering A*, Vol.238 ,pp.219-274,1997.
18- Zhang. Y. N, Cao. X, Larose. S and Wanjara. P,, "Review of Tools for Friction Stir Welding and Processing", *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol 51, No 3,2012.
19-Suri., A.,"An Improved FSW Tool for Joining Commerical Aluminum Plates", *Procedia Materials Science*, Vol.6, pp 1857-1864,2014.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]