نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال هفتم، شماره1، بهار و تابستان 1400، صفحه 50-41

تاثیر سرعت پیشروی ابزار بر خواص اتصال آلومینیم به فولاد توسط جوشکاری اصطکاکی همزدنی

مهرشاد علی‌مددی، مسعود گودرزی، سیدمحمدعلی بوترابی *

1- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران.

2- دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران.

3- استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران.

(دریافت مقاله: 1398/04/1؛ پذیرش مقاله: 1400/05/02)

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، ایجاد اتصال غیر هم‌جنس آلومینیم Al6061 به فولاد St52 توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی همزدنی و همچنین بررسی اثر سرعت پیشروی ابزار بر درشت ساختار و خواص مکانیکی اتصال حاصل است. با توجه به اینکه جوشکاری آلومینیم به فولاد توسط روش‌های ذوبی به دلیل تشکیل ترکیبات بین‌فلزی بسیار مشکل است از این‌رو با استفاده از جوشکاری اصطکاکی همزدنی سعی بر آن است که با تعیین و انتخاب پارامترهای بهینه، بتوان به اتصالی با ریزساختار و خواص مکانیکی مطلوب دست یافت. این تحقیق در سه سرعت پیشروی 16، 40 و 85 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. با توجه به نتایج آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس مشخص شد که لایهٔ تشکیل شده در درز اتصال عمدتاً ترکیب بین‌فلزی است. در سه سرعت پیشروی بالاترین استحکام کششی نهایی در سرعت 85 mm/min به مقدار 200 MPa بدست آمد. با توجه به منحنی تنش کرنش، شکست در دو سرعت 16 و 40 میلی‌متر بر دقیقه به صورت ترد بوده و در سرعت 85 میلی‌متر بر دقیقه شکست نرم است. با استفاده از آزمون ریزسختی سنجی، بیشترین سختی در منطقهٔ اختلاط آلومینیم 75 HV و در سمت فولاد به فاصله 0/2 mm از درز اتصال 315 HV بدست آمد، که بالاتر از فلزهای پایه (فلز پایهٔ آلومینیم به‌طور میانگین 53 HV و فلز پایهٔ فولاد به‌طور میانگین 245HV) است.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی همزدنی، اتصال غیرهم‌جنس، آلومینیم Al6061، فولاد St52، درشت ساختار، خواص مکانیکی.

The effect of tool transverse speed on the properties of aluminum-steel dissimilar joint by friction stir welding

M. Alimadadi, M. Goodarzi, S.M.A.. Boutorabi*

The School of Metallurgy and Materials Engineering of Iran University of Science and Technology.

(Received 22 June 2019 ; Accepted 24 July 2021)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: boutorabi@iust.ac.ir

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

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.4.5]

Abstract
This present study aimed to create an Al6061-St52 dissimilar joint and investigate the effect of the transverse speed by the friction stir welding process. Welding aluminum to steel is rugged by fusion methods because of the formation of brittle intermetallic compounds (IMCs). Therefore, to designate optimal parameters, acceptable IMC thickness, and mechanical properties determined. This research carried out different three transverse speeds of 16, 40 and 85 mm/min (with a constant pin offset of 0.2 mm). Geometry of tool's pin radius and height is 4mm and 1.8mm, respectively. In the transverse speed parameter, the highest ultimate tensile strength (UTS) of 200 MPa was obtained at 85 mm/min. According to the Energy Dispersive X-ray Spectroscopy results, an IMC layer formed in the joint interface. The heat input rate was calculated to designate the optimal parameters. In tensile specimens, fracture mainly occurred in the joints and within the aluminum stir zone due to the combination of thick IMC layer and steel fragments, respectively. The micro-hardness measurement results showed that at (85 mm/min) the hardness values were HV 75 in the aluminum stir zone and HV 315 in the AS vicinity of the interface region. This hardness value is much higher than the base metals (Aluminum base metal is an average of HV 53 and an average steel base metal of HV 245).

Keywords: Friction stir welding, Dissimilar joint, Aluminum 6061, St52 Steel, Macrostructure, Mechanical properties..

1- مقدمه

جوشکاری حالت جامد مجموعه فرایندهایی را شامل می‌شود که در آن‌ها اتصال بدون ذوب شدن فلز پایه شکل می‌گیرد [1]. جوشکاری اصطکاکی همزدنی نتایج مطلوب و قابل قبولی را به‌عنوان یک فرایند اتصال حالت جامد در اتصال آلیاژهای آلومینیم، نیکل، منیزیم، تیتانیم و فولاد، نشان داده است [3،2]. جوشکاری اصطکاکی همزدنی در سال 1991 توسط موسسهٔ جوش درکمبریج انگلستان به عنوان روشی برای اتصال حالت جامد و در ابتدا برای آلیاژهای آلومینیم ابداع شد[5،4]. با توجه به اینکه در این فرایند ذوب شدن صورت نمی‌گیرد و دما حدوداً تا 100°C زیر نقطه ذوب افزایش می‌یابد، عیوب کمتری در مقایسه با روش‌های ذوبی در اتصال پیش می‌آید [6]. با توجه به چگالی 7/8 g/cm^3 برای فولاد و 2/7 g/cm^3 برای آلومینیم، جایگزینی فولاد از طریق آلومینیم در صنعت باعث کاهش قابل توجه وزن خواهد شد. این مهم به‌دلیل جنبه‌های زیست محیطی در صنعت مانند بخش حمل و نقل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، لذا به دلیل اختـلاف زیاد در خواص فیزیکی آلومینیم و فولاد اتصال این دو فلز در صـــنعت بسیار مهم است.

با استفاده از جوشکاری اصطکاکی چندین پژوهش در رابطه با ریزساختار اتصال آلومینیم به فولاد و همچنین خواص مکانیکی و پارامترهای فرایند آن‌ها انجام شده است. اکثر پژوهش‌ها بر روی حضور ترکیبات بین‌فلزی در اتصال آلومینیم به فولاد تمرکز کرده‌اند که این ترکیبات باعث اثر منفی روی خواص مکانیکی می‌شود. حرارت ورودی کم در جوشکاری اصطکاکی همزدنی در مقایسه با جوشکاری ذوبی این ترکیبات را کاهش می‌دهد، اما نمی‌تواند آن‌ها را کاملاً از بین ببرد [7]. برای تعریف شرایط جوشکاری مطلوب برای یک اتصال قابل قبول و مطالعه تشکیل ترکیبات بین‌فلزی، لازم است رابطه بین استحکام اتصال و گرمای ورودی برای هر شرایط جوشکاری بررسی شود. چن مشاهده می‌کند که با افزایش سرعت پیشروی استحکام کششی در اتصال غیرهم‌جنس Al6061-SS400 افزایش یابد [8].

دهقانی و همکاران تأثیر سرعت عرضی ابزار بر روی اتصال St52 به Al5186 را بررسی کردند. مطالعه آن‌ها نشان می دهد که با افزایش سرعت جوشکاری، میزان ترکیبات بین فلزی به طور محسوسی کاهش می یابد[9] بنابراین استحکام اتصالات در سرعت جوشکاری بالا افزایش می یابد [9،10]. مطالعه دیگر آن‌ها نشان داد که افزایش UTS به وابستگی استحکام کششی به حرارت ورودی جوش نسبت داده می شود [10].

این مطالعه یک رابطه مستقیم بین ضخامت لایهٔ بین‌فلزی و میزان حرارت ورودی را نشان می‌دهد. بنابراین، تعیین ضخامت مطلوب لایه بین‌فلزی برای تعیین خواص مکانیکی مناسب قابل توجه است است. به این ترتیب، محاسبه میزان حرارت ورودی می‌تـواند ضخـامت لایه بین‌فلـــزی را پیش‌بینی کرده و در نتیجه با توجه به ضخامت لایه محل شکست مشخص شود.

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

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.4.5]

جدول1- ترکیب شیمیایی ورق آلومینیم برحسب درصد وزنی.

عنصر	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Fe	Ti	Al
درصد وزنی	0.5	0.2	0.03	0.7	0.14	0.3	0.03	باقیمانده

جدول2- ترکیب شیمیایی ورق فولاد برحسب درصد وزنی.

عنصر	C	Si	Mn	Cr	Cu	S	P	Fe
درصد وزنی	0.156	0.179	1.293	0.014	0.018	0.008	0.018	باقیمانده

جدول 3- تعیین نرخ حرارت ورودی برحسب سرعت پیشروی.

سرعت پیشروی (mm/min)	۵۱۶/۹	۴۰	۸۵
نرخ حرارت ورودی (j/mm)	۵/۹	۲/۴	۱/۱

جدول 4- نتایج بدست آمده از آزمون کشش نمونه‌ها بر حسب (MPa).

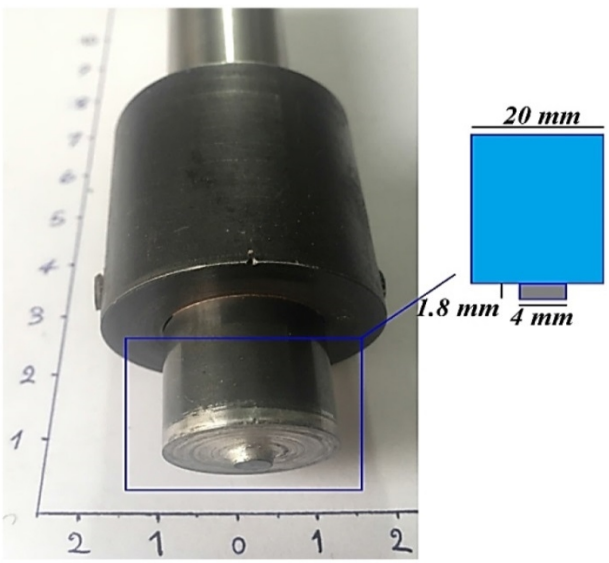
نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی(MPa)	محل شکست
فلزپایه آلومینیوم	۱۸۰	۲۹۵	-
فلز پایه فولاد	۶۸۰	۸۰۰	-
۱۶mm/min	۶۵	۸۶	درز اتصال
۴۰mm/min	۸۳	۱۳۵	درزاتصال
۸۵ mm/min	۱۱۰	۲۰۰	HAZ

متأسفانه، هیچ مطالعه ای در مورد تاثیر سرعت پیشروی بر اتصال غیر هم‌جنس آلومینیم Al6061 به فولاد St52 انجام نشده است. بنابراین، هدف از این مقاله تعیین ضخامت ترکیبات بین‌فلزی و محل شکست است.

2- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق برای انجام فرایند جوشکاری اصطکاکی همزدنی از ورق‌های آلومینیم Al6061 و فولاد St52 با ضخامت 2 mm و ابعاد 5 mm × 10 mm استفاده شد. با انجام آزمایش کوانتومتری، درصد عناصر ورق‌های آلومینیم Al6061 و فولاد St52 مشخص شد که به ترتیب در جدول‌های (1و2) نشان داده شده‌اند.

این فرایند جوشکاری با استفاده از دستگاه فرز، با اعمال نیروی عمـودی توسط دستگاه به ورق‌ها انجـام شد. همچنین ورق‌های فولاد و آلومینیم با یک بند و بست فولادی در کنار هم به صورت لب به لب ثابت نگه داشته شدند.



شکل1- ابزار کاربید تنگستنی و طرح دوبعدی شانه و پین.

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

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.4.5]



شکل2- فرایند جوشکاری اصطکاکی همزدنی ورق آلومینیم به فولاد و سامانه بند و بست فولادی در این تحقیق.

طبق پژوهش Ramachandran و همکاران [11] برای اتصال این دو فلز از یک ابزار کاربید تنگستنی با شانه و پین استوانه‌ای و با ابعاد قطر شانه 20 mm و قطر پین 4 mm و ارتفاع پین 1/8 mm استفاده شد که در شکل (1) ابزار و طرح دوبعدی آن نشان داده شده است.

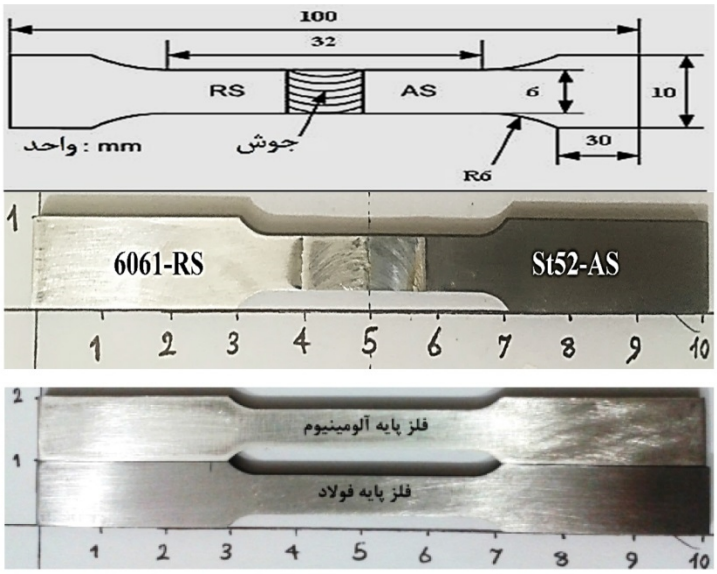
روش انجام آزمایش به‌این صورت بود که ابتدا ورق‌های آلومینیمی و فولادی پس از چربی‌زدایی به‌صورت لب به لب روی بند و بست فولادی ثابت شد و ابزار کاربید تنگستنی پس از بسته شدن روی دستگاه مماس بر ابتدای صفحه جوش قرار گرفت. لازم به ذکر است مطابق با مطالعات انجام شده آلومینیم در جهت پس‌رونده و فولاد در قسمت پیش‌رونده ثابت می‌شود که برای این‌کار جهت چرخش ابزار را به صورت ساعتگرد تغییر داده در حالی‌که ورق فولادی در سمت راست جهت جوشکاری قرار داده شد.

شکل (2) فرایند جوشکاری را نشان می‌دهد. برای بررسی استحکام اتصال نمونه آزمایش کشش از مقطع عمود بر ناحیهٔ جوش هر نمونه جوشکاری‌شده و به فاصله 7 الی 8 سانتی‌متر از ابتدای جوش، مطابق با استاندارد ASTM E8 [12] تهیه شده که در شکل (3) نمونهٔ استاندارد، تصویر واقعی نمونهٔ کشش جوش و نمونهٔ کشش فلز پایه آلومینیم و فولاد مشاهده می‌شود، و این نمونه‌ها با دستگاه کشش با نرخ کرنش 0/5 میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند.

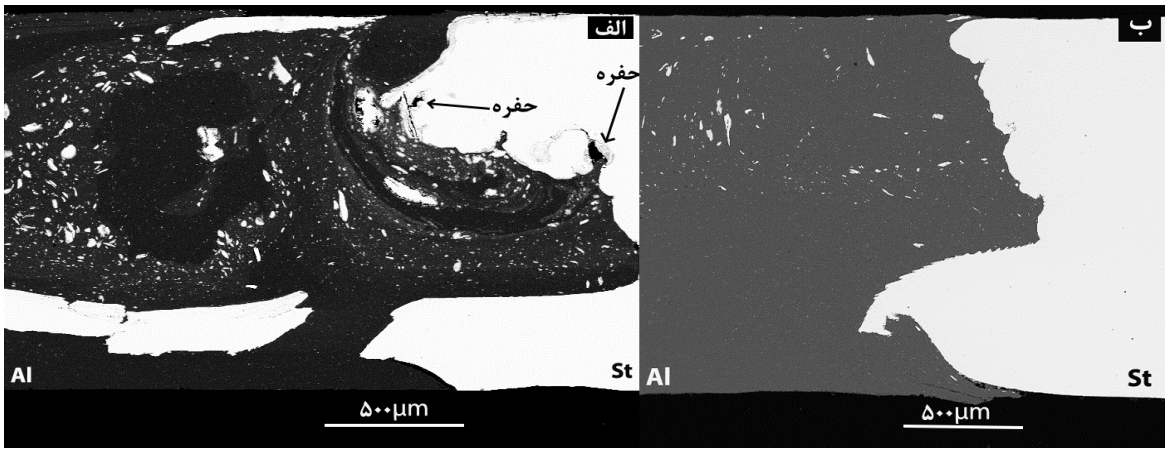
طبق پژوهش Watanabe و همکاران [13] در سرعت چرخشی1250 rpm در سطح جوش حفره بوجود می‌آید. Kimapong و همکارش [14] در جوشکاری فولاد SS400 و آلیاژ آلومینیم Al5083 به این موضوع دست یافتند که وقتی سرعت چرخش ابزار خیلی کم است، به علت گرمای ناکافی ایجادشده، پین زمان کافی برای خمیری کردن آلومینیم را ندارد و به علت امتزاج ناکافی بین Al و Fe از فصل مشترک شکست اتفاق می‌افتد و استحکام کم خواهد بود؛ لذا سرعت چرخشی 900 rpm برای جوشکاری انتخاب شد. همچنین سرعت چرخشی 900 rpm دلیلی بر ایجاد ترکیب بین‌فلزی در درز اتصال و اندازه‌گیری و بهینه کردن ضخامت آن می‌باشد.

برای بررسی کیفیت اتصال‌ها، نیاز به انجام آزمون‌های مختلف از جمله بررسی شکل ظاهری ناحیهٔ جوش، مطالعهٔ ریزساختار نواحی مختلف و تعیین فازها و ترکیب‌های ایجاد شده در این نواحی است. در بررسی‌های ساختاری از میکروسکوپ استریوگراف ساخت شرکت صا ایران برای بررسی درشت‌ساختار و از میکروسکوپ نوری ساخت شرکت UNION مدل VERSAMET-3 برای بررسی ریزساختار تا بزرگنمایی 1000 استفاده شد. همچنین برای مشخص نمودن نوع ترکیبات تشکیل شده در فصل مشترک آلومینیم و فولاد از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM/EDS استفاده و ازمقطع نمونه‌ها تصویر SEM گرفته شد و برای این‌کار از میکروسکوپ الکترونی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.4.5]



شکل 3- نمونه کشش استاندارد ASTM E8 (واحد:mm)، نمونه واقعی جوش و فلز پایه آلومینیم و فولاد (واحد: cm).



شکل 4-تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در حالت درشت‌ساختار، الف- سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه (پیکان‌ها نشان‌دهندهٔ حفره)، ب- سرعت پیشروی 85 میلی‌متر بر دقیقه.

روبشی (SEM) با آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس ساخت شرکت TESCAN مدل VEGA با ولتاژ شتاب دهنده 30 kV برای اندازه‌گیری ترکیب شیمیایی استفاده شد. برای آزمون کشش، از دستگاه کشش ساخت شرکت Instron مدل 8500 و برای ریزسختی‌سنجی ویکرز از دستگاه سختی‌سنجی ساخت شرکت شاب ساری مدل4600-1600 مورد استفاده قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- محاسبه نرخ حرارت ورودی

بر اساس مطالعه‌های صورت گرفته توسط Hirata و همکاران [15] گرمای ورودی متاثر از هم شانه و هم پین است که گرمای حاصل از پین در مقایسه با گرمای حاصل از شانه ناچیز بوده و همچنین با انتخاب قطر یکسان برای تمام شرایط جوشکاری می‌توان فقط گرمای ورودی از طریق شانه ابزار را درنظر گرفت. Frigaard و همکاران [16] عادله زیر را برای تولید گرما در واحد سطح و زمان طی فرایند جوشکاری اصطکاکی همزدنی پیشنهاد کردند:

$$Q_0 = \frac{4}{3}\pi^2 \mu P \omega R^3 \quad (1)$$

که در آن Q_0 توان خالص بر حسب وات، μ ضریب اصطکاک، P فشار اعمالی برحسب پاسکال، ω سرعت چرخش ابزار بر حسب دور بر ثانیه و R شعاع شانه ابزار برحسب متر است.

چرخش ابزار در فرایند جوشکاری اصطکاکی سبب ایجاد جریان

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.4.5]

گرما به داخل ناحیه جوش می‌شود. گرمای ورودی در واحد طول جوش می‌تواند توسط Q_0/V مورد بررسی قرارگیرد، در حالی که V سرعت پیشروی ابزار (m/s) است. گزارش شده است که در عمق وارد شدن ابزار، فشار اعمالی تقریبا ثابت باقی می‌ماند. با این حال، ضریب اصطکاک در طول جوشکاری اصطکاکی تقریبا ثابت است. بنابراین براساس تحقیقات Tanaka و همکاران [17] با حذف P وμ از رابطه و تقسیم دو طرف بر V نرخ گرمای ورودی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_0/V = \frac{4}{3}\pi^2\omega R^3/V \quad (2)$$

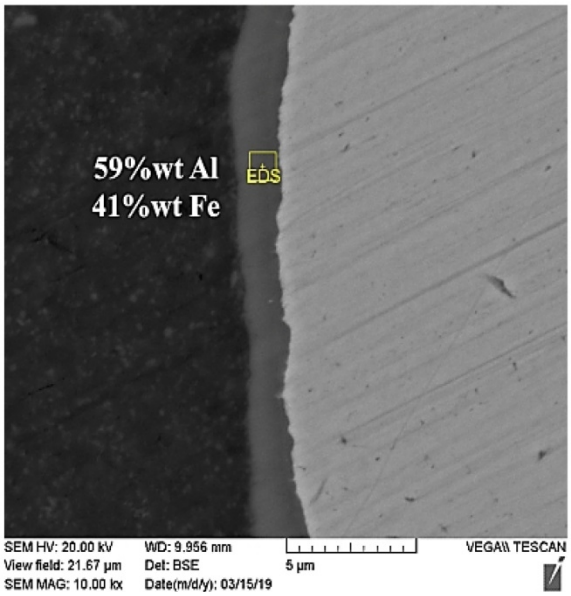
قبل از بررسی‌های ساختاری و همچنین بررسی خواص مکانیکی اتصال، لازم است که در هر نمونه نرخ حرارت ورودی محاسبه شود (که سرعت چرخشی ابزار ثابت و برابر 900 دور دردقیقه و شعاع شانهٔ ابزار 20 میلی‌متر است)، که نتیجهٔ آن در جدول (3) نشان داده شده است. با افزایش سرعت پیشروی نرخ حرارت ورودی کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال برای سرعت پیشروی 16 mm/min به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{Q_0}{V} = \frac{4}{3} \times 3.14^2 \times 900 \times 20^3 \times \frac{1}{16} = 5.91576\, j/mm \quad (3)$$

3-2- بررسی درشت‌ساختار

برای بررسی درشت‌ساختار با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در نمونه‌هایی با سرعت پیشروی متفاوت، دو نمونه با سرعت پیشروی 16 و 85 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد.

همانطور که در شکل (4) مشاهده می‌شود در نمونه‌ای با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه نسبت به سرعت 85 میلی‌متر بر دقیقه اختلاط فولاد در آلومینیم بیشتر است. در شکل (4) ملاحظه می‌شود در حالت کمترین سرعت پیشروی (16 mm/min)، تکه‌های جدا شدهٔ فولاد در سمت آلومینیم بسیار بیشتر از حالت با سرعت‌های پیشروی 85 میلی‌متر بر دقیقه است و همچنین جریان گردابی ایجاد شده توسط چرخش پین و شانهٔ ابزار به‌طور واضح دیده می‌شود. در سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه به دلیل حرارت ورودی بالا (بیشترین مقدار حرارت ورودی) میزان خمیری شدن فولاد در سمت آلومینیم به حدی رسیده است که آلومینیم فرصت سیلان کافی در قسمت‌های نشان داده شده توسط پیکان را نداشته و قبل از پرکردن کامل حفره‌ها منجمد شده است. آقاجانی و همکاران [18] نشان دادند که گرمای ورودی ناکافی در طول فرایند، باعث کاهش اختلاط بین آلومینیم و فولاد می‌شود و گرمای اصطکاکی کافی برای نرم شدن قسمت فولاد به‌وجود نمی‌آید.



شکل5- آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس روی لایه تشکیل شده در درز اتصال.

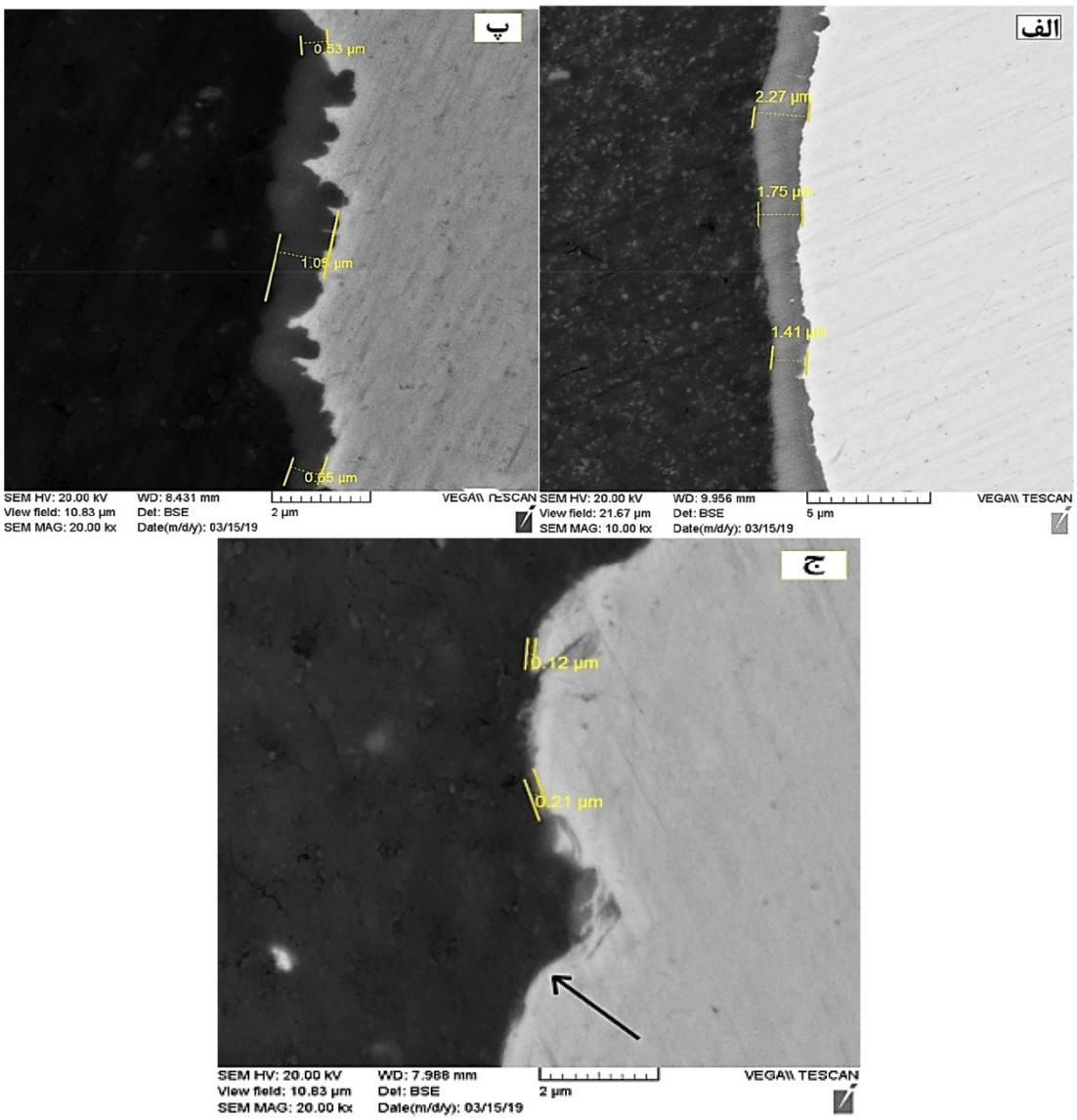
3-3- بررسی ترکیب بین‌فلزی و خواص مکانیکی اتصال

با توجه به حجم کم ترکیبات بین‌فلزی، در نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس پیک آن‌ها مشاهده نشد، لذا با اکتفا به نتایج آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس، درصد وزنی عناصر بدست آمده از لایه تشکیل شده در درز اتصال، مشخص شد که این لایه ترکیب بین‌فلزی است (شکل5). Agudo و همکاران [19] و Kundu و همکاران [20] ترکیب بین‌فلزی را در فصل مشترک نشان دادند.

برای بررسی ضخامت ترکیبات بین‌فلزی تشکیل شده، در هر نمونه تصویر از قسمت میانی اتصال، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی همانند شکل(6) گرفته شده است. در شکل(6) ضخامت ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در درز اتصال در سه سرعت پیشروی قابل ملاحظه است.

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

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.4.5]



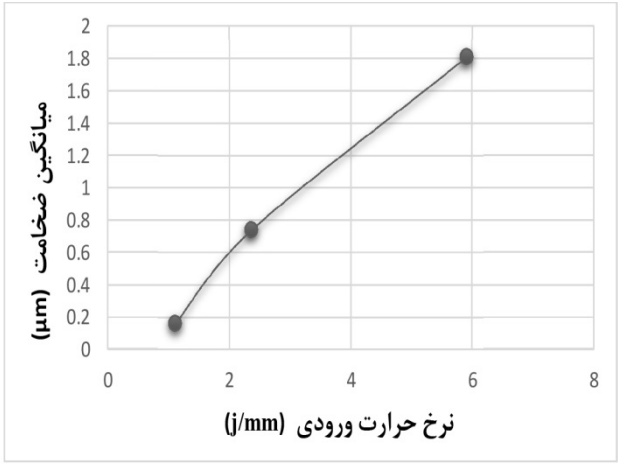
شکل 6- ضخامت ترکیب بین‌فلزی تشکیل شده در درز اتصال در سرعت‌های پیشروی، الف- 16mm/min، پ- 40mm/min، ج- 85 mm/min (پیکان نشان‌دهنده ترکیب بسیار نازک است).

برای تعیین رابطهٔ سرعت با ضخامت ترکیب، لازم است میانگین ضخامت‌ها محاسبه شود. همان‌طور که در تصویر مشخص است در هر سرعت پیشروی سه اندازه‌گیری ضخامت در نظر گرفته شد. به‌عنوان مثال در سرعت پیشروی 16 mm/min ضخامت‌های 2/27، 1/75، 1/41 میکرومتر اندازه‌گیری شده که میانگین آن‌ها 1/81 میکرومتر است.

با محاسبه نرخ حرارت ورودی ملاحظه شد که با افزایش سرعت پیشروی مقدار نرخ حرارت ورودی کاهش می‌یابد؛ در نتیجه با توجه به رابطهٔ میانگین ضخامت لایه ترکیب بین فلزی برحسب سرعت پیشروی، با کاهش حرارت ورودی میانگین ضخامت لایهٔ ترکیب بین‌فلزی کاهش می‌یابد. در شکل (7) نمودار نرخ حرارت ورودی برحسب میانگین ضخامت مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش در جدول (4) برحسب استحکام کششی و محل شکست نمونه‌ها نشان داده شده است. همانطور که در جدول (4) بدست آمده است، استحکام نهایی و استحکام تسلیم نمونه‌ها با افزایش سرعت پیشروی افزایش یافته است. همانطور مشاهده و محاسبه شد در سرعت‌های پیشروی متفاوت، با افزایش سرعت پیشروی و کاهش حرارت ورودی

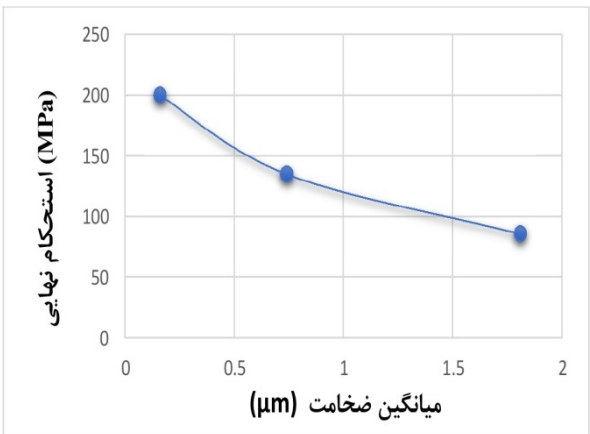
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.4.5]

ضخامت ترکیب بین‌فلزی تشکیل شده در درز اتصال کاهش یافت و در نمودار شکل (7) آورده شد.



شکل7- نمودار میانگین ضخامت بر حسب نرخ حرارت ورودی.

Ramachandran و همکاران [21] گزارش کردند که افزایش حرارت ورودی، همراه با اختلاط زیاد مواد باعث تشکیل لایهٔ بین‌فلزی ضخیم در درز اتصال می‌شود که این به نوبهٔ خود باعث استحکام ضعیف اتصال می‌شود. در جدول (4) ملاحظه می‌شود که با کاهش سرعت پیشروی و افزایش ضخامت لایه بین‌فلزی در درز اتصال، محل شکست نمونه‌ها از سمت آلومینیم به درز اتصال کشیده شده‌اند و این نشان‌دهنده کاهش مقاومت اتصال است. همانطور که در شکل (8) مشاهده می‌شود با افزایش حرارت ورودی و میانگین ضخامت لایه بین‌فلزی استحکام نهایی کاهش می‌یابد.



شکل 8- نمودار میانگین ضخامت لایه بین‌فلزی بر حسب استحکام نهایی.

با نتایج بدست آمده می‌توان گفت که در ضخامت‌های کمتر از 0/5 میکرومتر درز اتصال از استحکام کافی برخوردار بوده و شکست در فلز پایه آلومینیم اتفاق می‌افتد بنابراین ترکیب بین‌فلزی ضخیم در درز اتصال باعث افت استحکام می‌شود. شکل (9) نمودار تنش-کرنش نمونه‌هایی با سرعت پیشروی متفاوت را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود شکست در سرعت‌های پیشروی پایین به صورت ترد بوده و در سرعت پیشروی 85 میلی‌متر بر دقیقه بالا شکست نرم است و با کاهش ترکیبات بین فلزی در درز اتصال چقرمگی شکست نیز افزایش می‌یابد.

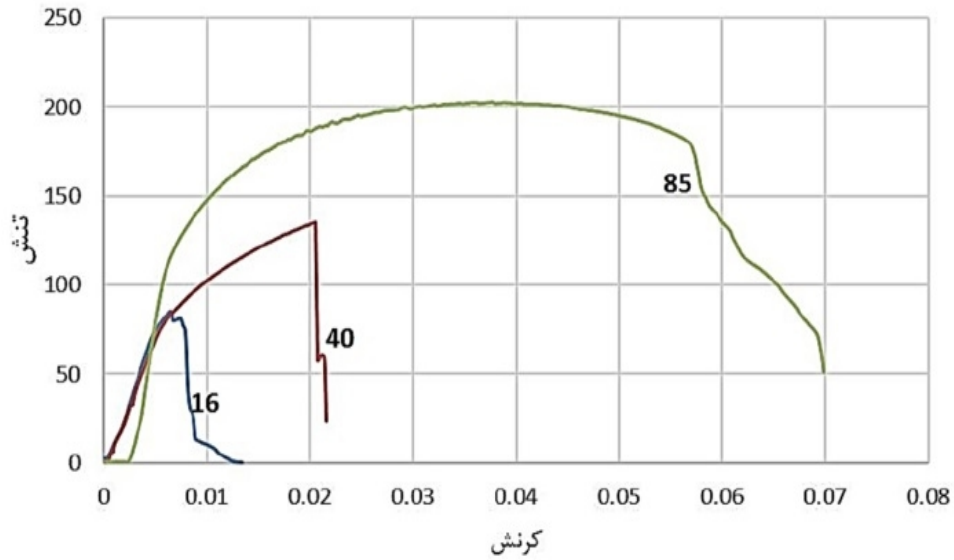
3-4- بررسی آزمون ریزسختی سنجی

سختی یکی از متغیرهای مهم در جهت تعیین کیفیت اتصال است. نتایج آزمون ریزسختی‌سنجی بدست آمده از نمونه‌هایی با سرعت پیشروی مختلف در شکل (10) آورده شده است. در پروفیل ریزسختی‌سنجی دیده می‌شود که سختی فلز پایه آلومینیم به‌طور میانگین 53 HV و سختی فلز پایه فولاد به‌طور میانگین 245 HV است. همانطور که مشاهده می‌شود سختی در قسمت فولاد و نزدیک به درز اتصال بیشترین مقدار خود را دارد و این به دلیل ریزدانه شدن و قرارگرفتن تحت عملیات ترمومکانیکی شدید در این قسمت است. در سمت فولاد و در منطقه TMAZ افزایش سختی نسبت به فلز پایه فولاد به دلیل کشیده شدن دانه‌ها رخ می‌دهد اما به دلیل درشت شدن دانه‌ها سختی نسبت به منطقه نزدیک به درز اتصال کاهش یافته است. بیشترین سختی در سمت فولاد در نمونه با سرعت پیشروی 85 میلی‌متر بر دقیقه HV 325 در نزدیک درز اتصال به‌دست آمد. Deepika و همکارش[22] بیشترین سختی را HV 192 در سمت فولاد و در نزدیک منطقهٔ دکمهٔ جوش گزارش کردند. با توجه به پروفیل سختی در شکل(4) مشاهده می‌شود که سختی در درز اتصال پایین‌تر از فلز پایه فولاد و بالاتر از فلز پایه آلومینیم است و این به دلیل تماس سنبه فرورونده در آلومینیم و فولاد به‌طور همزمان است.

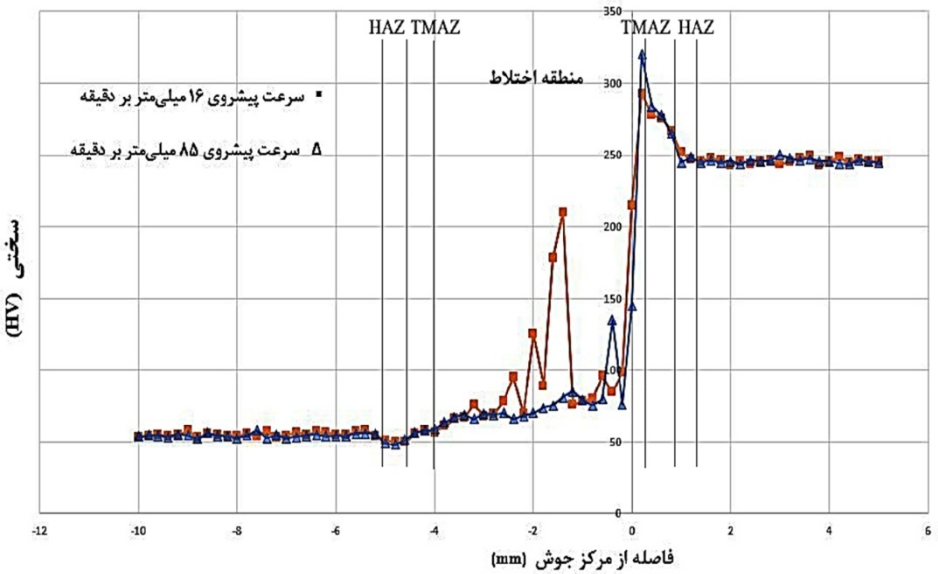
در شکل(4) سختی در درز اتصال نمونهٔ با سرعت پیشروی 16 mm/min بیشتـــر از سختی در درز اتصـال نمونه با سرعت

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

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.4.5]



شکل9- نمودار تنش (Mpa)- کرنش (mm) در سرعت‌های پیشروی متفاوت.



شکل10- نمودار سختی برحسب فاصلهٔ از مرکز جوش در نمونه‌های با سرعت پیشروی متفاوت.

پیشروی 85 mm/min است، این نتیجه به دلیل ترکیب‌های بین‌فلزی ضخیم در نمونهٔ با سرعت پیشروی 16 mm/min نسبت به نمونه با سرعت پیشروی 85 mm/min در درز اتصال است.

4- نتیجه گیری

- در سرعت پیشروی پایین به دلیل افزایش نرخ حرارت ورودی بر واحد طول جوش میزان خمیری شدن و اختلاط فولاد در داخل آلومینیم بیشتر می‌شود.
- با توجه به نتایج آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس لایه تشکیل شده در درز اتصال ترکیب بین فلزی است.
- با افزایش نرخ حرارت ورودی ضخامت لایه بین فلزی تشکیل شده در درز اتصال افزایش می‌یابد و باعث کاهش استحکام و چقرمگی اتصال می‌شود.
- شکست در سرعت‌های پیشروی پایین به صورت ترد بوده و در سرعت پیشروی 85 میلی‌متر بر دقیقه بالا شکست نرم است.

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

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.4.5]

منابع

[1] David H. Phillips, "Welding engineering An introduction." John Wiley & Sons, feb 2016.

[2] P. Kumar Arya, "A Review on Friction Stir Welding for Aluminium Alloy Composite," Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol., vol. 3, no. 6, pp. 216–221, 2015.

[3] M. Abbasi, T. W. Nelson, and C. D. Sorensen, "Transformation and deformation texture study in friction stir processed API X80 pipeline steel," Metall. Mater. Trans. A: Phys. Metall. Mater. Sci., vol. 43, no. 13, pp. 4940–4946, 2012.

[4] P. Bharat Raj Singh, "A Hand Book on Friction Stir Welding," M. Sciences, and T. Campus, June, 2012.

[5] A. Pradeep, "Friction Stir Welding of Steel, " Int. J. of Engineering Research and Development, 2012.

[6] M. Ilangovan, S. R. Boopathy, and V. Balasubramanian, "Microstructure and tensile properties of friction stir welded dissimilar AA6061-AA5086 aluminium alloy joints," Trans. Nonferrous Met. Soc. vol. 25, no. 4, pp. 1080–1090, 2015.

[7] M. Thomä, G. Wagner, B. Straß, B. Wolter, S. Benfer and W. Fürbeth, "Ultrasound Enhanced Friction Stir Welding (USE-FSW) of Hybrid Aluminum/Steel Joints," Frict. Stir Weld. Process,The Miner. Met. Mater. Soc, pp. 23–32, 12 Feb 2019.

[8] T. Chen, "Process parameters study on FSW joint of dissimilar metals for aluminum-steel," J. of Mater. Science., vol. 44, no. 10, pp. 2573-2580, 2009.

[9] M. Dehghani, A. Amadeh, and S. A. A. Akbari Mousavi, "Investigations on the effects of friction stir welding parameters on intermetallic and defect formation in joining aluminum alloy to mild steel," Mater. Des., vol. 49, pp. 433–441, 2013.

[10] M. Dehghani, S. A. A. Akbari Mousavi, and A. Amadeh, "Effects of welding parameters and tool geometry on properties of 3003-H18 aluminum alloy to mild steel friction stir weld," Trans. Nonferrous Met. Soc. of China (English Ed), vol. 23, no. 7, pp. 1957–1965, 2013.

[11] K. K. Ramachandran, N. Murugan, and S. Shashi Kumar, "Study on Dissimilar Butt Joining of Aluminum Alloy, AA5052 and High Strength Low Alloy Steel through a Modified FSW Process," Mater. Sci. Forum, vol. 830–831, pp. 278–281, 2015.

[12] ASTM Committee on Mechanical Testing, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," ASTM Int., vol. ASTM. Designation E8/E8M-13a, pp.1–28, 2013.

[13] T. Watanabe, H. Takayama, and A. Yanagisawa, "Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding," J. Mater. Process. Technol., vol. 178, no. 1–3, pp. 342–349, 2006.

[14] K. Kimapong and T. Watanabe, "Lap joint of A5083 aluminum alloy and SS400 steel by friction stir welding," Mater. Trans., vol. 46, no. 4, pp. 835–841, 2005.

[15] T. Hirata, T. Oguri, H. Hagino, T. Tanaka, S. Wook Chung, Y. Takigawa, K. Higashi, "Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy," Mater. Sci. Eng. A, vol. 456, no. 1–2, pp. 344–349, 2007.

[16] Frigaard, Grong, and O. T. Midling, "A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys," Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci., vol. 32, no. 5, pp. 1189–1200, 2001.

[17] T. Tanaka, T. Morishige, and T. Hirata, "Comprehensive analysis of joint strength for dissimilar friction stir welds of mild steel to aluminum alloys," Scr. Mater., vol. 61, no. 7, pp. 756–759, 2009.

[18] H. Aghajani Derazkola and F. Khodabakhshi, "Intermetallic compounds (IMCs) formation during dissimilar friction-stir welding of AA5005 aluminum alloy to St-52 steel: numerical modeling and experimental study," Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2018.

[19] L. Agudo, D. Eyidi, E. Arenholz, N. Jank, J. Bruckner, A. R. Pyzalla., "Intermetallic Fe x Al y -phases in a steel/Al-alloy fusion weld," J. Mater. Sci., vol. 42, no. 12, pp. 4205–4214, 2007.

[20] S. Kundu, D. Roy, R. Bhola, D. Bhattacharjee, B. Mishra, and S. Chatterjee, "Microstructure and tensile strength of friction stir welded joints between interstitial free steel and commercially pure aluminium," Mater. Des., vol. 50, pp. 370–375, 2013.

[21] K. K. Ramachandran, N. Murugan, and S. Shashi Kumar, "Influence of tool traverse speed on the characteristics of dissimilar friction stir welded aluminium alloy, AA5052 and HSLA steel joints," Arch. Civ. Mech. Eng., vol. 15, no. 4, pp. 822–830, Sep. 2015.

[22] Deepika M. Harwani and Vishvesh J. Badheka, "Effect of Shoulder Diameter on Friction StirWelding of Al6061 to SS 304, " Innovations in Infrastructure., vol. 757. pp 355-366, 2019.

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

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.4.5]