E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 9, Number 1, 2023



Microstructure and mechanical properties in dissimilar friction stir welding between aluminum 1050 and 316L stainless steel

M. Naseri Alenjagh, T. Saeid*

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

Received 29 January 2023 ; Accepted 12 April 2023

Abstract

The purpose of this research is to investigate the change of rotational speed and traverse speed on the microstructure and mechanical properties of the joint in friction stir welding of aluminum 1050 and 316L stainless steel. For this purpose, the microstructure, thickness of intermetallic compounds, hardness and tensile test on the joint were investigated. The proper selection of welding parameters leads to the creation of a joint with suitable metallurgical and mechanical properties. In this research, two rotational speeds of 560 and 900 rpm and four traverse speeds of 60, 80, 100 and 125 mm/min were performed. The microstructure consisted of four areas of the base metal, heat affected zone, thermo-mechanical affected zone and stir zone. In all the samples, the stir zone (SZ) contained a recrystallization microstructure with fine equiaxed grains. According to the Energy dispersive X-ray Spectroscopy results, an IMC layer formed in the joint interface. The hardness of the stir zone in all samples was higher than the aluminum base metal due to the formation of recrystallization fine equiaxed grains and the presence of steel particles. The best sample in terms of mechanical properties, mocrostructure and joint quality was obtained in the conditions of rotation speed of 900 rpm and advance speed of 125 mm/min. The strength was equal to 84 MPa with 77% efficiency.

Keywords: Friction stir welding, Dissimilar joint, 316L Stainless steel, Aluminum 1050, Intermetallic compounds, Microstructure and Mechanical properties.

*Corresponding Author: saeid@sut.ac.ir

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره1، بهار و تابستان 1402



ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس آلومینیم 1050 به فولاد زنگ نزن L 316 در جوشکاری همزن اصطکاکی

محمد ناصری النجق، توحید سعید*

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند.

دریافت مقاله: 1401/11/09 ؛ پذیرش مقاله: 1402/01/23

چکیده

هدف از انجام این پژوهش، بررسی تغییرات سرعت چرخشی و پیشروی ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال در جوشکاری همزن اصطکاکی آلومینیم 1050 و فولاد زنگ نزن 316L است. به همین منظور کیفیت اتصال، ریزساختار، ضخامت و نوع ترکیبات بین‌فلزی، آزمون سختی و کشش بر روی اتصال مورد بررسی قرار گرفت. انتخاب مناسب پارامترهای جوشکاری باعث به وجود آمدن اتصال با خواص متالورژیکی و مکانیکی مناسب می شود. در این تحقیق، دو سرعت چرخشی 560 rpm و 900 و چهار سرعت پیشروی60، 80، 100 و 125 mm/min به عنوان پارامترهای متغیر انتخاب شدند. ریزساختار از چهار ناحیه فلزپایه، ناحیه متأثر از حرارت، ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی و ناحیه همزده تشکیل شد. در تمامی نمونه‌ها منطقه همزده شامل ریزساختار تبلورمجدد یافته با دانه‌بندی ریز هم‌محور بود. با توجه به نتایج آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس مشخص شد که لایه تشکیل شده در فصل مشترک اتصال، ترکیب بین‌فلزی است. سختی ناحیه همزده در تمامی نمونه‌ها به دلیل تشکیل دانه‌های ریز هم‌محور تبلورمجدد یافته و وجود ذرات فولادی بالاتر از فلز پایه آلومینیم بود. بهترین نمونه از لحاظ خواص مکانیکی، ریزساختاری و کیفیت اتصال در شرایط سرعت چرخشی 900 rpm و سرعت پیشروی 125 mm/min به دست آمد که مقدار استحکام برابر 84 مگاپاسکال با بازده 77% بود.

کلمات کلیدی: جوشکاری همزن اصطکاکی، اتصال غیرهمجنس، فولاد زنگ‌نزن L 316، آلومینیم 1050، ترکیب بین‌فلزی، ریزساختار و خواص مکانیکی

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

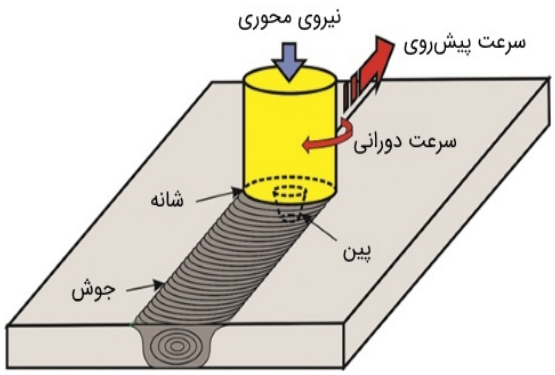
1- مقدمه

امروزه اتصال فلزات غیرهمجنس یک ایده جالب در صنعت مهندسی است. هدف از اتصال فلزات غیرهمجنس ترکیب خواص دو فلز برای افزایش کارایی و بازدهی قطعات تولیدی می‌باشد [1]. اتصال آلیاژهای آلومینیم به فولادهای زنگ‌نزن می‌تواند کاربرد وسیعی در بسیاری از صنایع خودروسازی، هوافضا، نظامی و کشتی‌سازی به منظور کاهش در وزن قطعات و افزایش کارایی برای رسیدن به بازدهی بالاتر داشته باشد [2]. همچنین برای سبک‌سازی سازه‌های حمل‌ونقل، امروزه فلزاتی با چگالی کم مانند آلومینیم در بخش‌هایی از قطعات جایگزین

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

فولادها شده‌اند که این خود نشانگر اهمیت روزافزون اتصال غیرهمجنس است. تشکیل ترکیبات بین‌فلزی با ضخامت زیاد در فصل مشترک و ایجاد ترک انجمادی منجر به عدم تمایل به استفاده از روش‌های جوشکاری ذوبی برای اتصال فلزات غیرهمجنس شده است [3، 4]. جوشکاری همزن اصطکاکی به دلیل ماهیت جامد، به عنوان روشی مناسب برای جوشکاری فلزات غیرهمجنس توجه بیشتر محققین را به خود جلب کرده است. در واقع در فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی عیوب ناشی از ذوب و انجماد و تنش‌های پسماند باقی‌مانده کاهش می‌یابد؛ چرا که فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی در دمایی زیر نقطه ذوب فلزات پایه انجام می‌شود. فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی به منظور بهبود خواص مکانیکی و کاهش وزن محصول تولیدی اهمیت زیادی پیدا کرده است. فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی برای اولین بار در موسسه جوش انگلستان در سال 1991 ابداع شد [5]. کلیات این فرایند بسیار ساده است، به این صورت که یک ابزار چرخان غیرمصرفی متشکل از شانه و پین وارد درز بین دو صفحه شده و با حرکت در امتداد آن‌ها باعث ایجاد اتصال بین قطعات می‌شود که در شکل (1) نشان داده شده است.



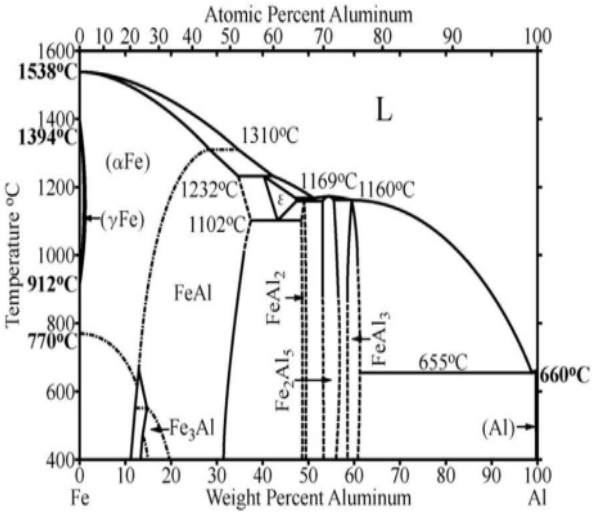
شکل1- نمایی از فرایند FSW [7].

دو طرف قطعه‌کار در کنار هم توسط فیکسچر محکم نگه داشته شده و پین وارد خط اتصال قطعه‌کار می‌شود و همراه با چرخش، طول خط اتصال را طی می‌کند. در این فرایند ابزار دو عمل اصلی گرم کردن قطعه و حرکت مواد به منظور اتصال را انجام می‌دهد. گرما به کمک اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار و تغییر شکل پلاستیک قطعه‌کار ایجاد می‌شود. حرارت باعث نرم شدن مواد اطراف پین شده و ترکیب حرکت چرخشی و پیشروی پین، باعث حرکت مواد از جلوی پین به عقب آن می‌گردد. از طرفی شانه که در بالای ناحیه خمیری قرار دارد با اعمال فشار بر روی مواد نرم شده امکان ایجاد اتصال میان دو فلز را به وجود می‌آورد [6]. از جمله پارامترهای مؤثر این فرایند می‌توان به شکل و هندسه ابزار، سرعت چرخشی، سرعت پیشروی، میزان عمق نفوذ پین ابزار و میزان جابه‌جایی ابزار از فصل مشترک (آفست ابزار) اشاره کرد [7]. یکی از مهم‌ترین چالش در فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی آلومینیم و فولاد، تشکیل ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال می‌باشد که نوع ترکیبات بین فلزی، شکل و ضخامت آن‌ها به پارامترهای جوشکاری بستگی دارد. تأثیر مخرب ترکیبات بین فلزی بر خواص استحکامی با افزایش ضخامت بیشتر می‌شود. لازم است با کنترل پارامترهای جوشکاری حرارت ورودی به جوش کاهش پیدا کند؛ به طوری که از تشکیل و یا افزایش ضخامت ترکیبات بین فلزی جلوگیری شود و از طرفی به مقدار کافی زیاد باشد که از تشکیل عیوب حفره و تونل جلوگیری کند [8]. حلالیت کم آهن در زمینه آلومینیم، تشکیل ترکیبات بین فلزی مختلف را در اشکال گوناگون در فصل مشترک اتصال آلومینیم به فولاد ترویج می‌دهد. با توجه به نمودار فازی دو جزئی نشان داده شده در شکل (2)، ترکیبات بین فلزی که ممکن است در فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی آلومینیم به فولاد تشکیل شوند، $FeAl_3$، Fe_2Al_3، Fe_2Al_5، $FeAl_2$، FeAl و Fe_3Al می‌باشد [9]. در اکثر پژوهش‌های انجام شده اتصال آلیاژهای آلومینیم به فولادها مورد بررسی قرار گرفته است.

بالاماگندیراورمان و همکارانش [10] اتصال آلومینیم خالص به فولاد زنگ‌نزن 304 با سرعت چرخشی 1000 rpm، سرعت پیشروی 60 mm/min و زاویه شیب ابزار نسبت به قطعه‌کار 2 درجه مورد مطالعه قرار دادند که متوجه شدند ترکیبات بین‌فلزی $FeAl_3$، Al_5Fe_2، $Al_{13}Fe_4$ و $FeAl_2$ در ناحیه فصل مشترک تشکیل شده و مقدار سختی در ناحیه همزده (SZ) به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی نسبت به سایر نواحی حداکثر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

مقدار خود است. شن و همکارانش [11] به بررسی سرعت پیشروی بر کیفیت اتصال لبه روی‌هم فولاد DP600 به آلومینیم 5754 پرداختند. در این تحقیق با افزایش سرعت پیشروی ابزار، ضخامت ترکیبات بین فلزی ایجاد شده در فصل مشترک اتصال کاهش پیدا نکرد؛ زیرا هر دو سرعت پیشروی پایین بودند و انرژی صرف اختلاط فولاد و آلومینیم شده است. در اغلب مطالعات انجام شده در مورد جوشکاری همزن اصطکاکی آلومینیم به فولاد، ضخامت ترکیبات بین فلزی با افزایش سرعت چرخشی ابزار و در نتیجه افزایش حرارت ورودی افزایش می‌یابد [3].



شکل2- دیاگرام فازی Al-Fe [9].

در پژوهش راماچاندران و همکارانش [12] که بررسی تأثیر سرعت پیشروی ابزار بر خواص اتصال فولاد HSLA به آلومینیم 5052 پرداختند، ترکیبات بین فلزی غنی از آلومینیم در فصل مشترک اتصال ایجاد شد که با کاهش سرعت پیشروی ضخامت آن‌ها افزایش یافت و منجر به کاهش استحکام کششی جوش شد. سلطانی و همکارانش [13] اتصال غیرهمجنس آلومینیم 5052 به فولاد زنگ‌نزن 304 به روش جوشکاری همزن اصطکاکی مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که با افزایش بیش از حد سرعت چرخشی یا کاهش سرعت پیشروی، حرارت ورودی به ناحیه اتصال افزایش می‌یابد که می‌تواند باعث تشکیل حفرات و عیوب در جوش شود و همچنین افزایش حرارت ورودی می‌تواند باعث افزایش اغتشاش و کاهش استحکام اتصال شود. زند سلیمی و همکارانش [14] آلیاژ آلومینیم 6061 را با استفاده از روش جوشکاری همزن اصطکاکی به فولاد زنگ‌نزن 430 متصل کردند. آن‌ها اثر پارامترهای سرعت چرخشی، سرعت پیشروی و جهت چرخش ابزار را بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال بررسی کردند. آنان گزارش کردند زمانی که فلز فولاد زنگ‌نزن در سمت پیش‌رونده قرار گرفت خواص مکانیکی بهبود پیدا کرده است. همچنین بالاترین استحکام کششی اتصال در سرعت چرخشی 560 rpm و سرعت پیشروی 80 mm/min حاصل شد. در ارتباط با تأثیر سرعت چرخشی بر روی استحکام کششی، کیماپونگ و همکارانش [15] در اتصال فولاد SS400 به آلیاژ آلومینیم 5083 به روش جوشکاری همزن اصطکاکی به این نتیجه دست یافتند هنگامی که سرعت چرخشی خیلی کم بود، به علت حرارت ناکافی، پین فرصت کافی برای خمیری کردن آلومینیم را نداشت و به دلیل امتزاج کم بین آلومینیم و فولاد از فصل مشترک شکست صورت گرفت و استحکام کاهش پیدا کرد. در مقابل با افزایش بیش از حد سرعت چرخشی، منیزیم موجود در آلومینیم اکسید شد و استحکام اتصال به طور چشم‌گیری کاهش پیدا کرد. دهقانی و همکارانش [16] تأثیر سرعت پیشروی بر روی اتصال فولاد St52 به آلومینیم 5186 را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت پیشروی ابزار، میزان ترکیبات بین فلزی کاهش می‌یابد. این مطالعه یک رابطه مستقیم بین ضخامت ترکیبات بین فلزی و میزان حرارت ورودی را نشان می‌دهد؛ بنابراین، تعیین ضخامت مطلوب ترکیبات بین فلزی برای تعیین خواص مکانیکی مناسب قابل توجه است. به این ترتیب، محاسبه میزان حرارت ورودی می‌تواند ضخامت لایه‌ی بین‌فلزی را پیش‌بینی کرده و در نتیجه با توجه به ضخامت لایه، محل شکست مشخص شود. برای تعریف شرایط جوشکاری مطلوب برای یک اتصال قابل قبول و مطالعه تشکیل ترکیبات بین فلزی ، لازم است رابطه بین استحکام اتصال و حرارت ورودی برای هر شرایط جوشکاری بررسی شود. هدف از انجام

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

این پژوهش ارزیابی تأثیر پارامترهای سرعت چرخشی و سرعت پیشروی ابزار بر روی خواص مکانیکی و متالورژی اتصال‌های ایجاد شده و در نهایت دست‌یابی به شرایط مناسب در این خصوص است.

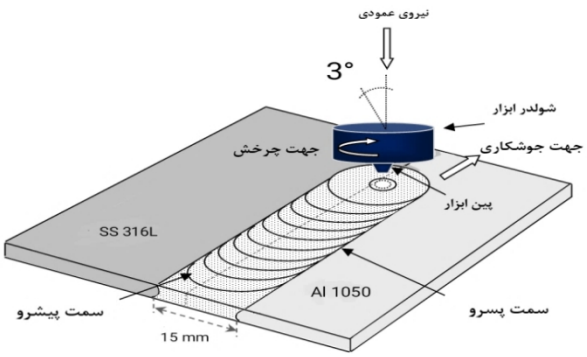
2- مواد و روش پژوهش

در این پژوهش ورق‌های 2 mm آلومینیم AA1050-H14 و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L توسط یک ماشین فرز معمولی به یکدیگر جوش داده شدند. خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی فلزات مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب در جدول‌های (1) و (2) نشان داده شده است.

جدول1- خواص مکانیکی آلومینیم 1050 و فولاد زنگ‌نزن 316L.

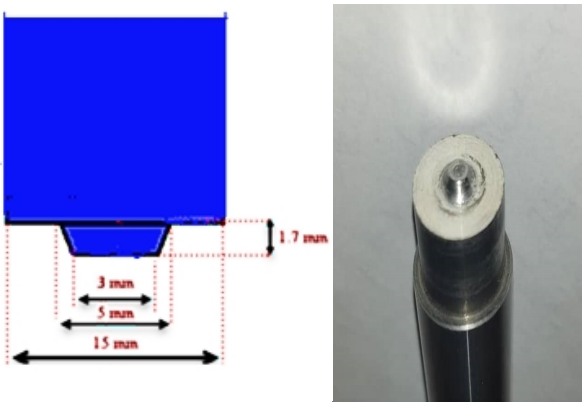
ماده	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	سختی (HV)
آلومینیم 1050	110±5	90	37±2
فولاد زنگ‌نزن 316L	540±20	256	200±5

جهت به دست آوردن ترکیب شیمیایی آلیاژها از طیف سنجی نشر نوری (آزمون کوانتومتری) استفاده شد. پس از قرارگیری ورق‌ها در قیدوبند جوشکاری، سطح تماس دو ورق‌ها با سنباده صاف و اکسید زدایی شد. در طراحی فرایند آزمایش، آلومینیم به عنوان ناحیه پس‌رونده و فولاد زنگ‌نزن به عنوان ناحیه پیش‌رونده قرار گرفتند. طرحواره فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی در شکل (3) نشان داده شده است. فرایند جوشکاری توسط یک ابزار که دارای پین مخروطی شکل و از جنس کاربید تنگستن بود، انجام شد.



شکل3- طرحواره‌ای از محل قرارگیری آلومینیم و فولاد زنگ‌نزن در سمت پس‌رونده و پیش‌رونده.

دلیل عدم انتخاب پین رزوه‌دار و استفاده از پین ساده، بهبود مقاومت پین در مقابل سایش و شکست می‌باشد. سختی این ابزار میانگین 2235±5 HV به دست آمد. قطر شانه ابزار 15 mm، قطر بزرگ پین ابزار 5 mm و قطر کوچک ابزار 3 mm بود. شکل هندسی ابزار مورد استفاده در این فرایند در شکل (4) نشان داده شده است.



شکل4- مشخصات هندسی و ابعادی هندسه ابزار.

جهت دوران ابزار در جهت گردش عقربه‌های ساعت بود و محور ابزار 3 درجه انحراف نسبت به بردار نرمال صفحات داشت. برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد آلومینیم برای ایجاد اتصال مناسب و کاهش سایش ابزار، ابزار جوشکاری 80% در درون فلز آلومینیم قرار گرفت. با توجه به امکانات دستگاه فرز انتخاب شده، فرایند در سرعت‌های چرخشی 560 و 900 rpm و سرعت‌های پیشروی 60، 80، 100 و 125 mm/min انتخاب شدند.

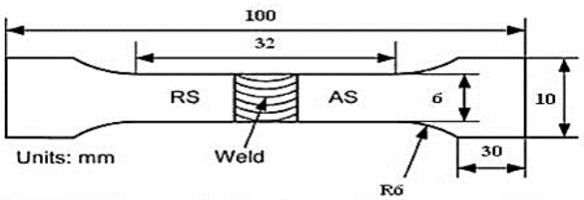
این پارامترها بر اساس مقالات مطالعه شده در زمینه فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی آلومینیم و فولادها، تعیین شدند [8، 17 و 18]. در این پژوهش با تغییر دادن سرعت چرخشی و پیشروی ابزار، هدف اصلی رسیدن به ضخامت بهینه ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک و تأثیر بر روی خواص مکانیکی اتصالات می‌باشد [19]. جدول (3) پنجره فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی را برای ایجاد جوش‌های بدون عیب در جوشکاری غیرهمجنس آلومینیم و فولاد زنگ‌نزن نشان می‌دهد که بر مبنای شکل ظاهری سطح جوش‌ها و نیز مقطع جوش به دست آمده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

جدول2-درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده فولاد زنگ‌نزن 316L و آلومینیم 1050 مطابق آزمایش طیف سنجی نشر نوری.

BM	ترکیب شیمیایی (wt%)								
Al 1050	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	V	Sb
	۹۹/۷۷۵	۰/۰۵۳	۰/۰۴۹	۰/۰۳۰	۰/۰۴۳	۰/۰۰۵	۰/۰۴۹	۰/۰۱۳	/۰۰۳
STS 316L	Fe	Si	Mn	Cr	Ni	C	P	S	Mo
	۶۸/۸۱۹	۰/۳۵۹	۱/۱۱۸	۱۶/۳۲۰	۱۱/۲۰۰	۰/۰۲۸	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۲/۰۶۶

در این جدول، شرایط از فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی که جوش‌های سالمی به وجود آورده با علامت a از جوش‌های ناموفق قابل تفکیک است. قابل ذکر است که در سرعت‌های چرخشی کمتر از 560 rpm و در سرعت‌های چرخشی بالاتر از 900 rpm نیز به دلیل ارتعاش بیش از حد ابزار، فرایند جوشکاری قابل انجام نبود. در بررسی‌های ریزساختاری از میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS-PMG3 استفاده شد. همچنین برای مشخص نمودن نوع ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک آلومینیم و فولاد زنگ‌نزن از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی استفاده و از مقطع نمونه‌ها تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شد و برای این کار از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی با آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس ساخت شرکت Tescan مدل MIRA3 FEG-میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید. تمامی نمونه‌های جوش توسط وایرکات برش عرضی داده شدند. برای بررسی نمونه‌های متالوگرافی از استاندارد ASTM-E3 استفاده شد. پس از سنباده‌زنی از شماره 100 تا 5000 و پولیش نهایی با خمیر الماسه، جهت مشاهده دانه‌های ریزساختار فولاد زنگ‌نزن 316L به وسیله میکروسکوپ نوری ، ابتدا روی سطح آلومینیم لاک زده شد و سپس در محلول رنگی 800 mL H_2O + 400 mL HCl + 48 g NH_4FHF + 1-2 g $K_2S_2O_5$ به مدت 60 ثانیه اچ شدند. برای مشاهده دانه‌های ریزساختار سمت آلومینیم 1050، پس از اینکه سطح فولاد زنگ‌نزن لاک زده شد، در محلول 200 mL H_2O + 5 mL HBF_4 در مدت زمان 2-3 min الکترواچ شدند. برای محاسبه اندازه دانه از نرم‌افزار ImageJ استفاده گردید. نحوه محاسبه متوسط اندازه دانه در منطقه SZ آلومینیم بدین گونه بود که از بخش‌های مختلف ناحیه اندازه‌گیری صورت گرفت و سپس به صورت میانگین بیان شد. به منظور بررسی خواص مکانیکی مقاطع جوشکاری، آزمون ریزسختی و کشش به عمل آمد. نمونه‌های کششی عرضی طبق استاندارد ASTM E8 تهیه شدند. سرعت حرکت فک‌های دستگاه کشش 1 mm/min بود. برای هر یک از نمونه‌های جوشکاری شده، 2 نمونه جهت انجام آزمون کشش انتخاب شد. شکل (5) ابعاد نمونه کشش عرضی تهیه شده را نشان می‌دهد. برای بررسی اثرات جوشکاری بر سختی نمونه‌ها در نواحی مختلف از آزمایش ریزسختی استفاده شده است. برای انجام آزمایش، توسط دستگاه Leco-AT-101 روی نیروی 50 g به مدت 15 s تنظیم و سپس سختی نواحی مختلف اتصال با فواصل 1 mm از هم مورد آزمایش قرارگرفت.



شکل5- شکل و ابعاد نمونه‌های آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM E8.

3- نتایج و بحث

3-1- محاسبه حرارت ورودی

جهت دستیابی به جوش با کیفیت مناسب می‌بایست حرارت ورودی جوش حاصل مقدار بهینه داشته باشد. این امر با معرفی کمیتی به نام شبه اندیس حرارتی قابل بیان خواهد بود. شبه اندیس حرارتی معیاری از حرارت ورودی فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$W = \omega^2/v \quad (1)$$

که در آن ω و v به ترتیب سرعت چرخشی و سرعت پیشروی ابزار هستند. همان‌طور که از این رابطه برمی‌آید سهم سرعت

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

چرخشی ابزار در میزان حرارت ورودی بیشتر از سرعت پیشروی ابزار می‌باشد [20]. با افزایش سرعت چرخشی، حرارت ورودی به جوش بیشتر خواهد شد؛ بنابراین، سیلان مواد راحت‌تر خواهد بود و کیفیت اتصال از نظر وجود عیوب حفره و تونل بهتر خواهد شد. چرا که در این پژوهش با افزایش سرعت چرخشی به 900 rpm حرارت ورودی افزایش و سیلان مواد به میزان کافی افزایش یافت و اتصال در سرعت‌های پیشروی بالا ظاهر مناسبی پیدا کرد.

جدول3- پنجره فرایند FSW در جوشکاری آلومینیم 1050 و فولاد زنگ‌نزن 316L بر مبنای شکل ظاهری سطح جوش.

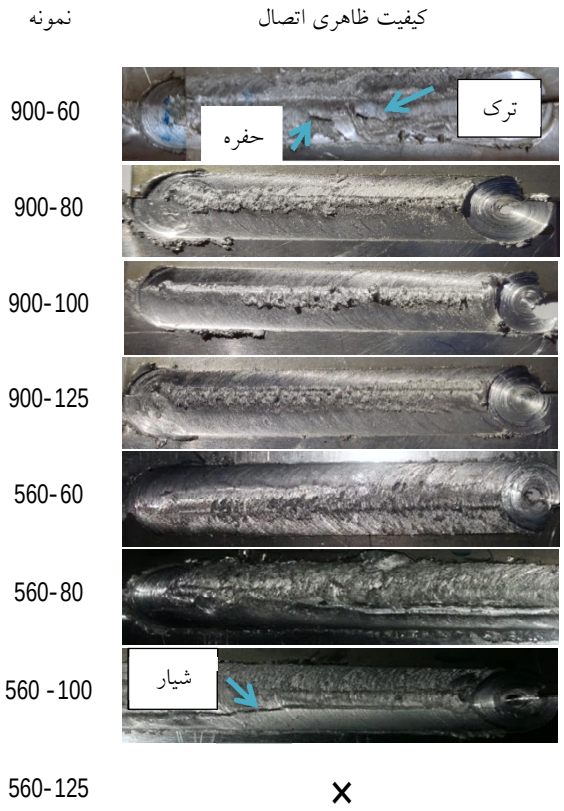
سرعت چرخشی (rpm)		جوش سالم a جوش ناسالم × جوش انجام‌نشده -
900	560	
×	×	60
a	×	80
a	×	100
a	-	125

سرعت پیشروی (mm/min)

3-2- بررسی کیفیت ظاهری جوش

بررسی کیفیت ظاهری جوش‌های به دست آمده نشان داد که نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی 560 rpm و سرعت‌های پیشروی 60، 80 و 100 mm/min دارای عیوب سطحی مانند شیار و حفره بوده که در شکل (6) آورده شده است. این عیوب ناشی از سرعت چرخشی کم ابزار و در نتیجه حرارت ورودی کم برای ایجاد اتصال سالم است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش سرعت پیشروی و در نتیجه کاهش شدید حرارت ورودی، به دلیل سیلان کمتر در محل اتصال، میزان و اندازه این عیوب افزایش یافت.

طبق مطالعات صورت گرفته در این زمینه [3، 16] این عیوب زمانی ایجاد می‌شوند که حرارت ورودی فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی کافی نباشد. در چنین شرایطی ماده نمی‌تواند به راحتی سیلان پیدا کند و شکاف ایجاد شده در اثر عبور پین را پر کند. در صورتی که حرارت ورودی تعیین کننده باشد، با افزایش سرعت پیشروی و یا کاهش سرعت چرخشی ابزار، حرارت ورودی کاهش می‌یابد و سیلان پلاستیک مواد به اندازه کافی نخواهد بود و در این صورت عیوبی مثل حفره و شیار به وجود می‌آید [8].



شکل6- کیفیت ظاهری نمونه‌ها در شرایط سرعت چرخشی 560 و 900 rpm و سرعت‌های پیشروی مختلف.

نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی 900 rpm و سرعت‌های پیشروی مختلف کیفیت ظاهری قابل قبولی را نشان دادند. البته سطح نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی 900 rpm و سرعت پیشروی 60 mm/min تشکیل پلیسه، ترک و حفره را نشان می‌دهد که دلیل آن حرارت ورودی زیاد تولید شده در این نمونه است. با افزایش سرعت پیشروی ظاهر جوش یکنواخت‌تر شد؛ به عبارت دیگر خمیری شدن آلومینیم

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

در سطح جوش کمتر شد. در کل می‌توان گفت که با افزایش سرعت پیشروی فورج مواد خمیری از قسمت جلو به درون اتصال بهتر و این مسأله باعث از بین رفتن عیوب و شکل‌گیری جریان مناسب در ناحیه اتصال گردید. در تمامی نمونه‌ها فولاد زنگ‌نزن در سمت بالای تصویر و آلومینیم در سمت پایین تصویر قرار دارد. نتایج کلی بررسی کیفیت ظاهری نمونه‌های جوشکاری شده به طور خلاصه در جدول (4) ارائه شده است.

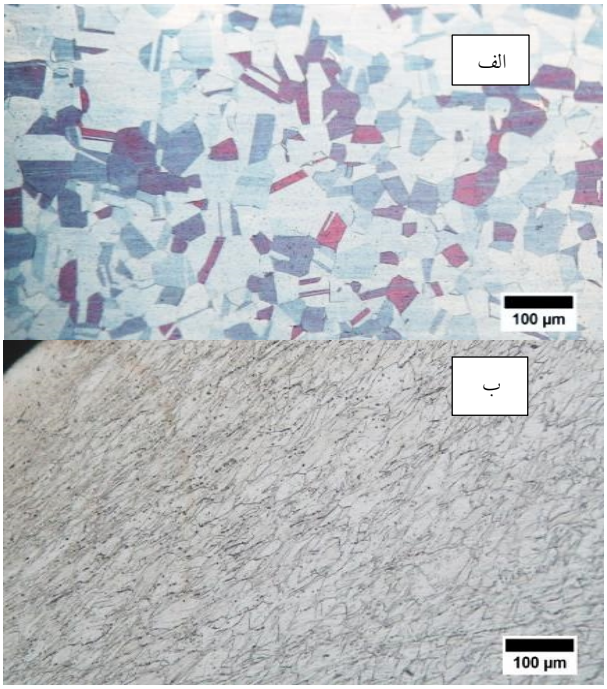
جدول 4- بررسی کیفیت ظاهری نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط مختلف.

نتایج کیفیت ظاهری نمونه-ها		سرعت چرخشی (rpm)	
		560	900
سرعت پیشروی (mm/min)	60	وجود عیب شیار در ناحیه نزدیک به فصل مشترک اتصال به دلیل سرعت چرخشی و حرارت ورودی کم	تشکیل پلیسه، حفره و ترک در ناحیه اتصال به دلیل حرارت ورودی زیاد و جریان نامناسب مواد در زیر شانه ابزار
	80	وجود عیب شیار در ناحیه نزدیک به فصل مشترک اتصال به دلیل سرعت چرخشی و حرارت ورودی کم	تشکیل پلیسه به دلیل حرارت ورودی زیاد
	100	افزایش میزان و اندازه عیب شیار به دلیل کاهش شدید حرارت ورودی در نتیجه سیلان کم در محل اتصال	عدم تشکیل عیب شیار، حفره و ترک به دلیل حرارت ورودی کافی جهت سیلان مواد در قسمت عقب ابزار
	125	عدم اتصال موفق به دلیل افزایش میزان عیوب	عدم تشکیل عیب شیار، حفره و ترک به دلیل حرارت ورودی کافی جهت سیلان مواد در قسمت عقب ابزار

3-3- ریزساختار مناطق مختلف جوش آلومینیم به فولاد

3-3-1- ریزساختار سمت فولادی منطقه جوش

شکل (7) نمونه‌ای از ریزساختار سمت فولاد زنگ‌نزن 316L فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی را نشان می‌دهد. ریزساختار شامل دو ناحیه مجزا فلز پایه و ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی بود.



شکل7- الف- ریزساختار BM و ب- ناحیه TMAZ فولاد زنگ‌نزن 316L.

تصویر الف در شکل (7) ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی را نشان می‌دهد. ریزساختار فولاد زنگ‌نزن شامل زمینه آستنیتی هم‌محور با میانگین اندازه دانه 30±5 µm بود. این منطقه در شرایط عدم حضور هرگونه رسوبات کاربیدی قرار دارد؛ زیرا با توجه به ریزساختار، این آلیاژ پس از تولید به روش نورد، به منظور حذف رسوبات و ناهمگنی‌های ایجاد شده در حین تولید تحت عملیات حرارتی آنیل انحلالی قرار گرفته است. همچنین دوقلویی‌های آنیلی به خوبی قابل مشاهده هستند. به دلیل اینکه فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی انرژی نقص در چیده شدن پایینی دارند؛ بنابراین دوقلویی آنیلی به آسانی تولید می‌شود. این دوقلویی‌ها در مرحله آنیل کردن در اثر رشد جوانه‌های دوقلویی که در حین تغییر شکل پلاستیکی به وجود آمده‌اند، تشکیل شده است. طبق پژوهش انجام شده توسط خسروانی نژاد و همکارانش [21] که بر روی اتصال فولاد زنگ‌نزن 316 به فولاد کم‌کربن St37 به روش جوشکاری همزن اصطکاکی انجام دادند، مشاهده کردند که فلز پایه فولاد

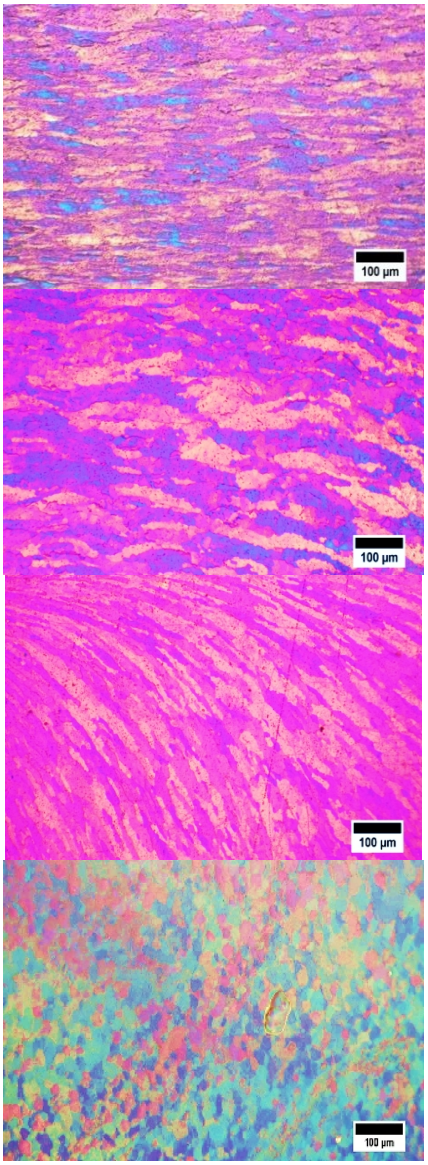
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

زنگ‌نزن شامل دانه‌های آستنیتی هم‌محور با میانگین اندازه دانه 23 µm می‌باشد. تصویر (ب) در شکل (7) ناحیه ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی فولاد زنگ‌نزن را نشان می‌دهد. ریزساختار این ناحیه دارای دانه‌های تغییر شکل یافته در نتیجه عملکرد ابزار در فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی می‌باشد. ریزساختار در نزدیکی فصل مشترک به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید نسبت به فلزپایه ریزدانه شده است. ناحیه متأثر از حرارت در سمت فولاد زنگ‌نزن مشاهده نشد. تحقیقات صورت گرفته در زمینه جوشکاری همزن اصطکاکی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی نیز عدم تشکیل این ناحیه را گزارش کرده‌اند [22]. دلیل عدم تشکیل این ناحیه در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی می‌تواند مربوط به رسانایی حرارتی کم این فولادها در مقایسه با سایر فولادها باشد. این میزان رسانایی حرارتی کم سبب می‌شود که حرارت نسبتاً کمی به خارج از ناحیه جوش انتقال یافته و در نتیجه نواحی اطراف جوش تحت تأثیر حرارت کمتری قرار گیرند.

3-3-2- ریزساختار سمت آلومینیمی منطقه جوش

شکل (8) نواحی مختلف فلز پایه، ناحیه ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی، ناحیه ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه SZ را در سمت آلومینیم نشان می‌دهد. تصویر (الف)، فلزپایه آلومینیم را نشان می‌دهد که دانه‌های تشکیل شده در این منطقه به صورت کشیده می‌باشد که دلیل آن به خاطر انجام نورد قبل از جوشکاری است. تصویر (ب)، ناحیه متأثر از حرارت آلومینیم را نشان می‌دهد. در این ناحیه ماده دچار تغییر شکل پلاستیک نشده و ریزساختار آن مشابه فلز پایه آلومینیم است با این تفاوت که به دلیل حرارت وارد شده به این ناحیه، اندازه دانه‌های آن نسبت به فلزپایه آلومینیم بزرگ‌تر شده است.

تصویر (ج)، ناحیه ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی آلومینیم را نشان می‌دهد. ریزساختار این منطقه تحت تأثیر حرارت و کار مکانیکی قرار گرفته و به دلیل ناکافی بودن کرنش حاصل از پین در حال چرخش، تبلورمجدد رخ نداده و ریزدانگی در این ناحیه اتفاق نیفتاد [23]. دانه‌های این منطقه به صورت کشیده بوده و تغییر جهت دانه‌ها به دلیل تغییر شکل شدید ناشی از چرخش ابزار است.



شکل 8- ریزساختار نواحی مختلف آلومینیم: الف- BM آلومینیم 1050، ب- ناحیه HAZ آلومینیم، ج- ناحیه TMAZ آلومینیم، د- ناحیه SZ.

تصویر (د)، ناحیه SZ را نشان می‌دهد. در ناحیه SZ دانه‌های ریز تبلورمجدد یافته مشاهده می‌شود. مکانیزم تبلورمجدد در این ناحیه به نوع ماده بستگی دارد. در فلزات با انرژی نقص چیدن بالا مانند آلیاژهای آلومینیم، مکانیزم تبلور مجدد غالب، مکانیزم تبلورمجدد دینامیکی پیوسته است. به دلیل تغییر شکل پلاستیکی شدید و مکانیزم تبلورمجدد دینامیکی پیوسته در منطقه SZ دانه‌های ریزتر و هم‌محور تشکیل شده است [24].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

منطقه SZ در سمت آلومینیم به دلیل وجود ذرات توزیع شده فولاد در زمینه، می‌توان به صورت یک ساختار شبه کامپوزیتی در نظر گرفت.

طبق مطالعات صورت گرفته در این زمینه [8] می‌توان گفت به سبب تولید حرارت بالا و تغییر شکل پلاستیک شدید ناشی از چرخش ابزار مکانیزم تبلورمجدد دینامیکی در این ناحیه رخ می‌دهد، به صورتی که در این ناحیه دانه‌ها نسبت به دانه‌های فلز پایه ریزتر شده و به‌صورت هم‌محور قرار می‌گیرند. با زیاد شدن انرژی نقص در چیدن فرایندهایی مانند لغزش متقاطع و صعود نابه‌جایی‌ها زیاد می‌شود که به صورت تبلورمجدد دینامیکی پیوسته باعث ریزتر شدن دانه می‌شود.

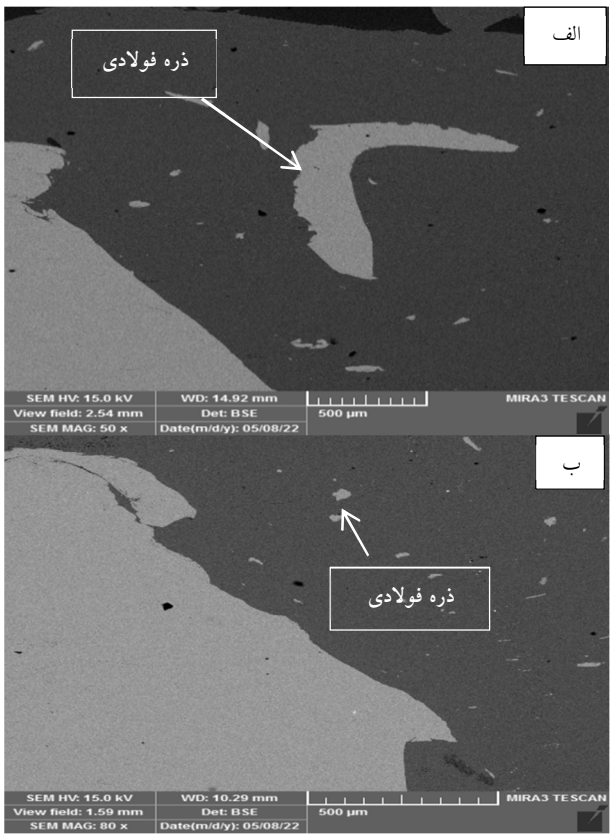
3-4- بررسی درشت ساختار

برای بررسی درشت ساختار با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در نمونه‌های با سرعت پیشروی متفاوت، دو نمونه با سرعت پیشروی 60 و 125 mm/min در یک سرعت چرخشی ثابت 900 rpm انتخاب شدند. همان‌طور که در شکل (9) مشاهده می‌شود در نمونه‌ای با سرعت پیشروی 60 نسبت به سرعت پیشروی 125 mm/min اختلاط فولاد در آلومینیم بیشتر است.

در حالت کمترین سرعت پیشروی 60 mm/min، در قسمت بالا و میانی جوش به دلیل حرارت اصطکاکی بیشتر توسط شانه ابزار موجب افزایش حرارت ورودی شد، اختلاط و خمیری شدن افزایش یافت؛ اما در سرعت پیشروی 125 mm/min با کاهش حرارت ورودی ذرات فولادی کمتر و کوچک‌تر در منطقه SZ توسط پین ابزار دیده می‌شود [23].

3-5- بررسی ترکیبات بین فلزی

ترکیبات بین فلزی نقش تعیین کننده‌ای در خواص اتصال بین آلومینیم و فولاد دارند. در این بخش سعی شده است که با تعیین و اندازه‌گیری ضخامت این ترکیب‌ها، اثر آن‌ها روی خواص مکانیکی اتصال بررسی شود. در ابتدا به بررسی ضخامت ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در بعضی نمونه‌ها پرداخته می‌شود. برای نمونه‌ها تصویر از قسمت میانی اتصال، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده است [23]. با توجه به آنالیز انرژی پرتو ایکس لایه خاکستری رنگ یک ترکیبات بین فلزی از آلومینیم و فولاد است که در ادامه نتایج آن بررسی خواهد شد.



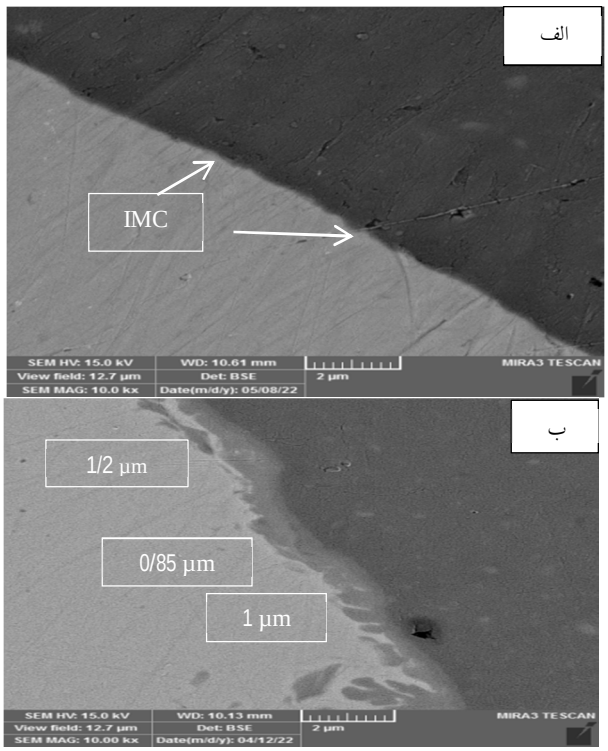
شکل9- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در حالت درشت ساختار: الف-سرعت پیشروی 60 mm/min و ب- سرعت پیشروی 125mm/min.

با توجه به نسبت ω^2/v، افزایش ω و کاهش v باعث بالاتر رفتن حرارت ورودی و افزایش دمای نواحی اطراف ابزار می‌شود. طبق این نسبت مشخص است که میانگین ضخامت ترکیبات بین فلزی افزایش می‌یابد. همچنین ضخامت ترکیبات بین فلزی به گرما، فشار و زمان بستگی دارد. طبق تحقیقاتی که انجام شده است می‌توان این نتیجه را استنباط کرد که با افزایش حرارت ورودی ضخامت ترکیبات بین فلزی بیشتر می‌شود [25].

شکل (10) ضخامت ترکیبات بین فلزی شکل گرفته در فصل مشترک اتصال براساس سرعت چرخشی را نشان می‌دهد. به طور کلی تشکیل و رشد لایه‌های ترکیبات بین فلزی به دما و

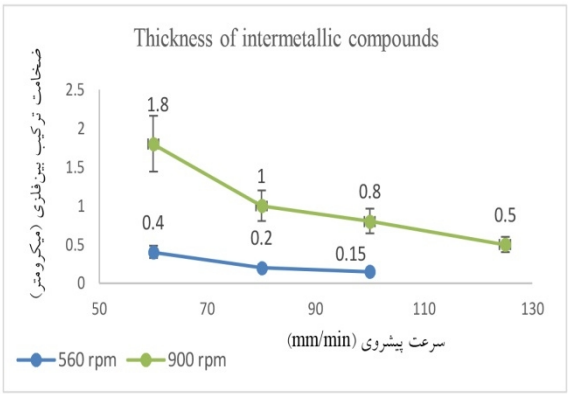
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

تغییر شکل ماده بستگی داشت. افزایش سرعت چرخشی منجر به افزایش حداکثر دما در جوش و دما بالا منجر به نفوذ اتم‌ها و رشد لایه بین‌فلزی شد. همچنین مواد نزدیک پین تحت تغییر شکل پلاستیک شدید با نرخ کرنش بالا قرار گرفت که منجر به افزایش نفوذ و واکنش ترکیبات بین فلزی شد. هرچند افزایش سرعت چرخشی ابزار باعث شد که جریان سیلان پلاستیک مواد در ناحیه اتصال به خوبی همزده شود ولی به دلیل دما بالا و کار مکانیکی بیشتر ضخامت لایه بین‌فلزی رشد یافت. با توجه به تصاویر (الف) و (ب)، با افزایش سرعت چرخشی از 560 به 900 rpm در سرعت پیشروی ثابت 80 mm/min ضخامت لایه‌ها از 0/25 به میانگین 1 میکرومتر رسید. در سرعت‌های پیشروی 60، 100 و 125 هم با افزایش سرعت چرخشی به دلیل افزایش حرارت ورودی، ضخامت لایه‌های بین‌فلزی افزایش یافت.



شکل10- ضخامت IMC تشکیل شده در فصل مشترک اتصال در سرعت پیشروی ثابت 80 mm/min و سرعت‌های چرخشی الف- 560 و ب- 900 rpm.

شکل (11) نمودار رابطه میانگین ضخامت ترکیبات بین فلزی با سرعت پیشروی را نشان می‌دهد. در شکل (12) ضخامت ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک اتصال در چهار سطح سرعت پیشروی قابل ملاحظه است. برای تعیین رابطه سرعت پیشروی با ضخامت ترکیب، لازم است میانگین ضخامت‌ها محاسبه شود. با محاسبه حرارت ورودی ملاحظه شد که با افزایش سرعت پیشروی مقدار حرارت ورودی کاهش می‌یابد؛ در نتیجه با توجه به نمودار میانگین ضخامت برحسب سرعت پیشروی، با کاهش حرارت ورودی، میانگین ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی کاهش می‌یابد.



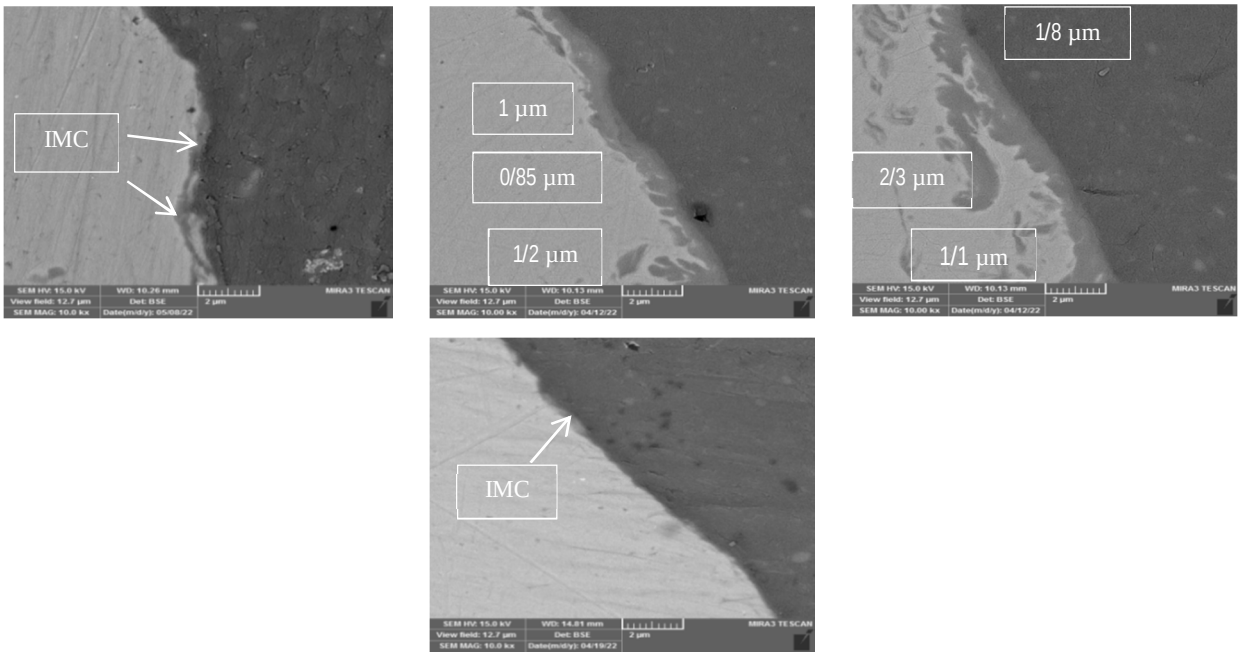
شکل 11- نمودار میانگین ضخامت IMC در شرایط سرعت‌های پیشروی ثابت 60، 80، 100 و mm/min 125 و سرعت‌های چرخشی متغیر 560 و 900rpm.

برای بررسی دقیق‌تر محل اتصال و با توجه به اینکه اگر مقدار فاز تشکیل شده کمتر از 5% باشد، دستگاه تحلیل پراش پرتو ایکس قادر به شناسایی آن نیست، در محل اتصال آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس برای نمونه جوشکاری شده تحت شرایط سرعت چرخشی 900 rpm و سرعت پیشروی 125 mm/min انجام شد که در شکل (13) آورده شده است. برای بررسی نفوذ در عرض فصل مشترک و بررسی احتمال تشکیل ترکیبات بین فلزی ، آنالیز انرژی پرتو ایکس به صورت خطی و نقطه‌ای گرفته شد. در واقع چون هدف بررسی وجود ترکیب بین‌فلزی Al-Fe بود، تمامی عناصر به جز Al و Fe محدود شدند. تجزیه و تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی و انرژی پرتو ایکس برای بررسی تشکیل ترکیبات بین فلزی صورت گرفت.

شکل (13) تصویر (الف)، طیف سنجی نقطه‌ای انرژی پرتو ایکس برای نقطه‌ای از اتصال را نشان می‌دهد، تصویر (ب)

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]



شکل12- ضخامت IMC تشکیل شده در سرعت چرخشی ثابت 900 rpmو سرعت‌های پیشروی الف- 60، ب-80، ج- 100 و د- 125mm/min .

میکروسکوپ الکترونی روبشی و تصویر (ج)، طیف سنجی خطی آنالیز انرژی پرتو ایکس مربوط به همان اتصال را نشان می‌دهد. با توجه به اشکال و نتایج طیف سنجی نقطه‌ای که در جدول (5) آمده است و همچنین با مراجعه به نمودار فازی Al-Fe که در شکل (2) نشان داده شده است، مشخص شد که با توجه به نتایج، نزدیک‌ترین ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در نقاط شماره 1 ترکیب بین‌فلزی غنی از آهن FeAl [26] بود.

جدول5- نتایج طیف سنجی نقطه‌ای آنالیز EDS برای شماره 1.

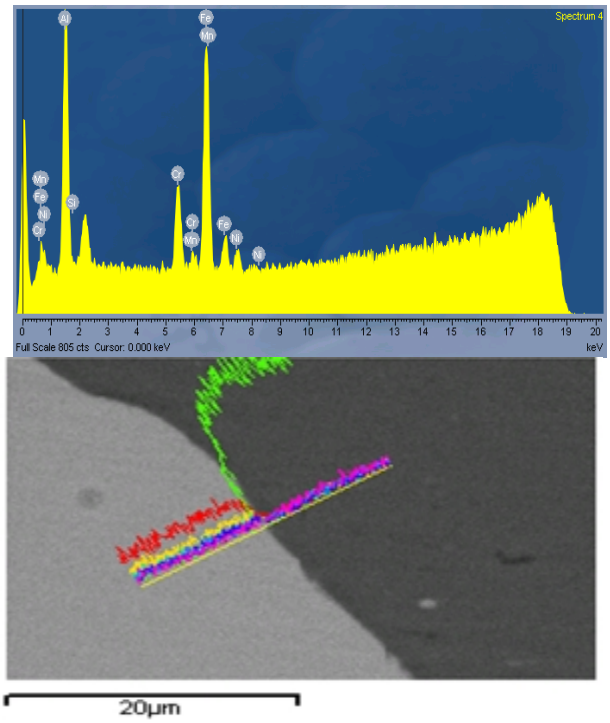
شماره نقطه	درصد اتمی آهن	درصد اتمی آلومینیم	ترکیب بین‌فلزی
1	52/31	47/69	FeAl

3-6- آزمون کشش

برای نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی 560 rpm و سرعت‌های پیشروی 60، 80 و 100 mm/min نشان داد که به دلیل وجود عیوب در این نمونه‌های جوشکاری شده، این نمونه‌ها از ناحیه SZ و فصل مشترک دچار شکست شدند. این در حالی است که در شرایط سرعت چرخشی 900 rpm، استحکام نهایی نمونه‌ها با افزایش سرعت پیشروی افزایش یافته است. همان‌طور که محاسبه شد با افزایش سرعت پیشروی و کاهش حرارت ورودی ضخامت ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال کاهش یافته است. اتصالات ایجاد شده با شرایط 900 rpm و سرعت‌های پیشروی بالا، ضعیف‌ترین بخش اتصالات ناحیه متأثر از حرارت آلومینیم بود که دلیل آن رشد دانه در ریزساختار بود. در نسبت‌های (ω^2/v) بالا (900 rpm و 60 mm/min) به دلیل تشدید تشکیل ترکیبات بین فلزی همراه با عیوب جوشکاری ایجاد شده در ناحیه SZ به دلیل دما بالا میزان استحکام کششی کاهش یافت. در (ω^2/v) پایین (سرعت چرخشی 560 rpm و سرعت‌های پیشروی مختلف) با اینکه درصد ترکیبات بین فلزی کمتری نسبت به اتصالات با (ω^2/v) بالاتر، تشکیل می‌شود، ولی ایجاد عیوب خود باعث کاهش شدید در استحکام کششی این اتصالات شد. Du و همکاران [27] گزارش کردند که هر چه ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی در محل اتصال کمتر باشد، استحکام اتصال می‌تواند افزایش پیدا کند. نتایج به دست آمده از انجام آزمون کشش جوش‌های تولیدی در جدول (6) و شکل (14) آورده شده است. در برخی مواد گزارش شده است که نمودار تنش-کرنش داندانه‌داری

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

دارند. این نوع نمودار نشان دهنده‌ی تغییرات ریزساختاری ناهمگن در ماده است. جوانه‌زنی و رشد دانه‌ها، حرکت ناهمگن نابه‌جایی‌ها (اثر پورتوین-لوشاتلیه) ناشی از اتم‌های محلول یا برهم‌کنش تهی‌جایی‌ها با نابه‌جایی‌ها می‌تواند باعث به وجود آمدن این نوع رفتار در مواد شود. همچنین مقادیر استحکام کششی برای نمونه‌های جوشکاری شده تحت شرایط مختلف سرعت چرخشی و پیشروی ابزار به صورت نمودار ستونی در شکل (15) آورده شده است.



شکل13- الف- آنالیز نقطه‌ای تفکیک انرژی پرتو ایکس، ب) تصویر SEM مربوط به اتصال تحت شرایط سرعت چرخشی 900 rpm و سرعت پیشروی 125 mm/min، ج) آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس از خط اتصال.

جدول 6- نتایج به دست آمده از آزمایش کشش نمونه‌ها بر حسب استحکام کششی (MPa).

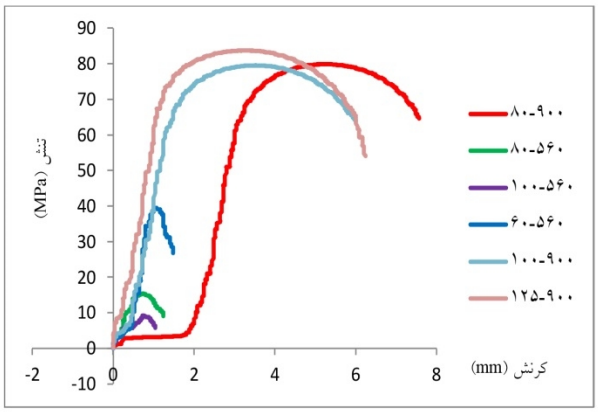
نمونه	استحکام کششی (MPa)	محل شکست
560-60	25±3	فصل مشترک
560-80	15±3	فصل مشترک و SZ
560-100	10±5	SZ
900-60	14±3	SZ
900-80	54±4	فصل مشترک
900-100	79±3	HAZ
900-125	84±3	HAZ
BM Al 1050	110±5	-
STS 316L	540±20	-

3-7- آزمون ریزسختی

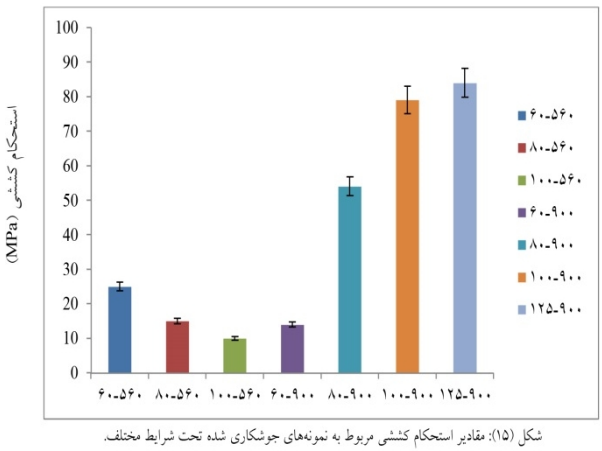
شکل (16) پروفیل ریزسختی را در سطح مقطع بهترین نمونه اتصال (سرعت چرخشی 900 rpm و سرعت پیشروی 125 mm/min) نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در ورق آلومینیم، مقدار سختی منطقه SZ بالاترین سختی در سمت آلومینیم است. از منطقه SZ به سمت فلز پایه، ابتدا سختی افت پیدا می‌کند و سپس رفته‌رفته با وارد شدن به فلزپایه سختی افزایش می‌یابد. بدین ترتیب که دانه‌های ریز و هم‌محور شکل گرفته بر اثر پدیده تبلورمجدد دینامیکی پیوسته در منطقه SZ باعث افزایش سختی این منطقه نسبت به فلزپایه می‌گردند. مقدار سختی در ناحیه SZ به دلیل وجود ذرات توزیع شده فولاد، مقادیری غیریکنواخت داشت. در ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی آلومینیم به دلیل عدم رخ دادن تبلورمجدد، سختی این منطقه نسبت به منطقه SZ کاهش یافته است. هم‌چنین سختی در منطقه ناحیه متأثر از حرارت به دلیل فرایند رشد دانه، کاهش یافته و به مرور رفتار سختی به سمت فلز پایه رفتار صعودی پیدا می‌کند. بیش‌ترین مقدار سختی نیز در منطقه ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی فولاد زنگ‌نزن بود که علت آن حرارت و تغییر شکل پلاستیکی شدید در این ناحیه است.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

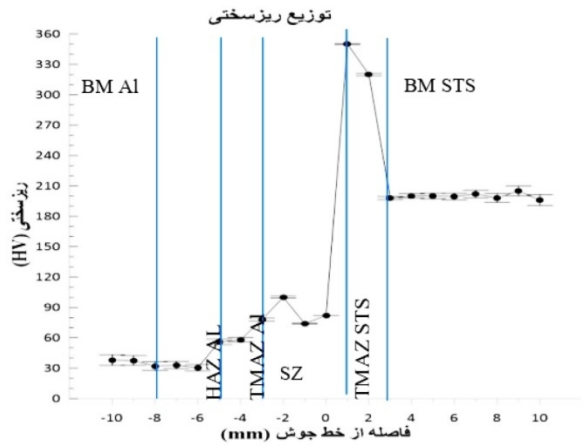


شکل 14- نمودار تنش (MPa)- کرنش (mm) در سرعت‌های پیشروی و چرخشی متفاوت.



شکل (۱۵): مقادیر استحکام کششی مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده تحت شرایط مختلف.

شکل15- مقادیر استحکام کششی مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده تحت شرایط مختلف.



شکل16- نمودار سختی بر حسب فاصله از مرکز جوش در نمونه با سرعت چرخشی 900 rpm و سرعت پیشروی 125mm/min.

به طور کلی، طبق تحقیقات صورت گرفته [2، 15 و 23] آنچه که سختی منطقه اتصال و نواحی اطراف آن را پس از جوشکاری تحت تأثیر قرار می‌دهد سه متغیر حرارت ورودی به قطعه، سرعت سرد شدن و میزان تغییر شکل پلاستیکی ایجاد شده حین فرایند جوشکاری می‌باشد، بنابراین هر کدام از متغیرهای جوشکاری که بر این متغیرهای ذکر شده تأثیرگذارند در شکل‌گیری ساختار نهایی حائز اهمیت هستند، بنابراین نیاز به رابطه‌ای می‌باشد تا ارتباط بین سرعت چرخشی و سرعت پیشروی را با میزان حرارت ورودی و میزان تغییر شکل پلاستیکی مشخص نماید. از طرفی بررسی‌های اخیر مشخص می‌کند که دمای بیشینه سیکل حرارتی عامل غالب در تعیین اندازه دانه تبلورمجدد یافته می‌باشد. بدین منظور می‌توان به رابطه استفاده شده که دمای بیشینه ایجاد شده حین فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی را محاسبه می‌کند، اشاره کرد [28]:

$$T_p/T_m=K(\omega^2/\nu\times10^4)^{\alpha}$$

در این رابطه T_m دمای ذوب آلیاژ مورد استفاده و برابر 660 درجه سانتی‌گراد، K مقدار ضریب ثابت وابسته به نوع آلیاژ و برابر 0/65، α مقدار ضریب ثابت وابسته به نوع آلیاژ و برابر 0/04، ω سرعت چرخشی ابزار و ν سرعت پیشروی ابزار می‌باشند. با داشتن مقادیر K و α می‌توان از این رابطه استفاده کرد. به عنوان مثال برای سرعت چرخشی 900 rpm و سرعت پیشروی 125 mm/min به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_p/660= 0.65\ (900\times900/\ 125\times10^4)^{0.04} _\ T_p= 421\ ^\circ C$$

4- نتیجه‌گیری

- با افزایش سرعت پیشروی و یا کاهش سرعت چرخشی، حرارت ورودی در طول جوش کاهش یافت به طوری که حرارت ورودی و سیلان پلاستیک کم مواد باعث ایجاد شکاف در ناحیه اتصال گردید.

- در ناحیه همزده که تحت تأثیر تغییر شکل پلاستیک و شرایط دمایی بسیار بالا قرار گرفته است، تبلورمجدد دینامیکی پیوسته رخ داده و ساختار دانه تغییر یافته است. در ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی آلومینیم، ریزساختار تحت تأثیر حرارت و کار مکانیکی قرار گرفته و به دلیل ناکافی بودن کرنش حاصل از

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

پین در حال چرخش، تبلورمجدد رخ نداده و ریزدانه شدن در این ناحیه اتفاق نیفتاد. دانه‌های این منطقه به صورت کشیده نسبت به فلز پایه قرار داشت.

- با افزایش سرعت پیشروی ابزار و یا کاهش سرعت چرخشی باعث کاهش حرارت ورودی شده و ضخامت ترکیبات بین‌فلزی تشکیل شده در فصل مشترک اتصال کاهش یافت.

- با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی/انرژی پرتو ایکس بررسی شد که ترکیب بین‌فلزی تشکیل شده در فصل مشترک اتصال نمونه جوشکاری شده تحت شرایط سرعت چرخشی 900 rpm و سرعت پیشروی 125 mm/min غنی از آهن از نوع FeAl می‌باشد.

- آزمون کشش نشان داد که تمام نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخشی ثابت 560 rpm به دلیل وجود عیوب ناشی از حرارت ورودی کم، از ناحیه فصل مشترک و منطقه همزده دچار شکست شدند. این در حالی است که با افزایش سرعت چرخشی و سرعت پیشروی (سرعت چرخشی 900 rpm و سرعت‌های پیشروی 100 و 125 mm/min) ضعیف‌ترین بخش ناحیه ناحیه متأثر از حرارت بود که به دلیل رشد دانه شکست از این ناحیه اتفاق افتاد. شرایط بهینه پارامترهای جوشکاری همزن اصطکاکی سرعت چرخشی 900 rpm و سرعت پیشروی 125 mm/min می‌باشد که مقدار بیشینه استحکام کششی برابر 77% استحکام کششی فلز پایه آلومینیم است.

- نتایج آزمون ریزسختی نشان داد که سختی منطقه همزده به دلیل وجود ذرات فولادی پخش شده در زمینه آلومینیم و دانه‌بندی ریز و تبلورمجدد یافته همواره بالاتر از فلزپایه آلومینیم است. بیشترین میزان سختی مربوط به ناحیه نزدیک درز اتصال سمت فولاد به دلیل ریزدانه شدن و قرار گرفتن تحت عملیات ترمومکانیکی شدید بود.

منابع

1-T. Ogura, Y. Saito, T. Nishida, H. Nishida, T. Yoshida, N. Omichi, M. Fujimoto, and A. Hirose, "Partitioning evaluation of mechanical properties and the interfacial microstructure in a friction stir welded aluminum alloy/stainless steel lap joint", Scripta materialia 66 (2012) 531-534.

2-R. Rafiei, A.O. Moghaddam, M.R. Hatami, F. Khodabakhshi, A. Abdolahzadeh, and A. Shokuhfar, "Microstructural characteristics and mechanical properties of the dissimilar friction-stir butt welds between an Al-Mg alloy and A316L stainless steel", The international journal of advanced manufacturing technology 90 (2017) 2785-2801.

3-T. Tanaka, T. Morishige, and T. Hirata, "Comprehensive analysis of joint strength for dissimilar friction stir welds of mild steel to aluminum alloys", Scripta materialia 61 (2009) 756-759.

4- M. Movahedi, A.H. Kokabi, S.M. Seyed Reihani, and H. Najafi, "Mechanical and microstructural characterization of Al-5083/St-12 lap joints made by friction stir welding", Procedia engineering 10 (2011) 3297-3303.

5-R.S. Mishra and M.W. Mahoney, "Friction stir welding and processing", Materials science and engineering 50 (2005) 1-78.

6- R.S. Mishra, P. De, and N. Kumar, "Friction stir welding and processing", Science and engineering (2014) 1-338.

7-P.R. Berndt, J.H. Neethling, H. Lombard, M.N. James, and D.H. Hattingh, "Microstructural characterization of precipitates in Al 5083-H321", Materials and design 335 (2005) 229-435.

8-M. Pourali, A. Abdollah-zadeh, T, Saeid, and F. Kargar, "Influence of welding parameters on intermetallic compounds formation in dissimilar steel/aluminum friction stir welds", Journal of alloys and compounds 715 (2017) 1-8.

9-S.A. Hussein, A.S.M. Tahir, and A.B. Hadzley, "Characteristics of aluminum-to-steel joint made by friction stir welding: A review", Materials today communications 5 (2015) 32-49.

10-M. Balamagendiravaman, S. Kundu, and S. Chatterjee, "An analysis of microstructure and mechanical properties on friction stir welded joint of dissimilar 304 stainless steel and commercial pure aluminum", Archives of metallurgy and materials 62 (2017) 1813-1817.

11-Z. Shen, Y. Chen, M. Haghshenas, and A.P. Gerlich, "Role of welding parameters on interfacial bonding in dissimilar steel/aluminum friction stir welds", Engineering science and technology, an international journal 18 (2015)270-277.

12-K.K. Ramachandran, N. Murugan, and S. Shashi Kumar, "Influence of tool traverse speed on the characteristics of dissimilar friction stir welded aluminum alloy, AA5052 and HSLA steel joints", Archives of civil and mechanical engineering 15 (2015) 822-830.

13-ع. سلطانی، م. شاکری، س. نوروزی و ح. جمشیدی، "تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی اتصال لبه‌روی‌هم آلیاژ آلومینیم به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی"،

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]

نشریه علمی- پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)، دوره 46، زمستان 1393، صفحه 35 تا 43.

14-S. Zandsalimi, A. Heidarzadeh, and T. Saeid, "Dissimilar friction-stir welding of 430 stainless steel and 6061 aluminum alloy: Microstructure and mechanical properties of the joints", Journal of materials design and applications 233 (2018) 1791-1801.

15-K. Kimapong and T. Watanabe, "Effect of welding process parameters on mechanical property of FSW lap joint between aluminum alloy and steel", Materials transactions 46 (2005) 2211-2217.

16-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", Materials and design 49 (2013) 433-441.

17-R. Jabraeili, H.R. Jafarian, R. Khajeh, N. Park, Y. Kim, A. Heidarzadeh, and A.R. Eivani, "Effect of FSW process parameters on microstructure and mechanical properties of the dissimilar AA2024 al alloy and 304 stainless steel joints", Materials science and engineering: A 814 (2021) 140981.

18-M. Habibnia, M. Shakeri, S. Nourouzi, and M.K. Besharati Givi, "Microstructural and mechanical properties of friction stir welded 5050 Al and 304 stainless steel plates", The international journal of advanced manufacturing technology 76 (2015) 819-829.

19-Q. Zhao, H. Ma, G. Qin,"On the formation of interfacial compounds in the 2A14 Al alloy/steel friction welded joint: A comparative study", Journal of manufacturing processes 83 (2022) 398-413.

20-R.S. Mishra, Z.Y. Ma and I. Charit, "Friction stir processing: a noval technique for fabrication of surface composite", Materials science engineering: A 341 (2003) 307-310.

21-A. Khorovaninezhad, M. Shamanian, A. Rezaeian, and M. Atapur," Investigation of mechanical properties of AISI 316 austenitic stainless steel and St 37 low carbon steel dissimilar joint by friction stir welding", Journal of advanced materials in engineering 34 (2) (2015) 89-101.

22-S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano, and M. Inagaki, "Microstructural characterization of stir zone containing residual ferrite in friction stir welded 304 austenitic stainless steel" Science and technology of welding and joining 10 (2005) 550-556.

23-M. Alimadadi, M. Mahmoudniya, M. Goodarzi, and S.M.A. Boutorabi, "Effect of tool transverse speed and pin offset on the properties of friction stir welding Al6061-St52 dissimilar joint", journal of advanced joining processes 5 (2022) 100116.

24-H. Uzun, C.D. Donne, A. Argagnotto, T. Ghidini, and C. Gambaro, "Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel", Materials and design 26 (2005) 41-46.

25-R.P. Mahto, C. Gupta, M. Kinjawadekar, A. Meena, and S.K. Pal,"Weldability of AA6061-T6 and AISI 304 by underwater friction stir welding", Journal of manufacturing processes 38 (2019) 370-386.

26-M. Sahu and S. Ganguly, "Distribution of intermetallic compounds in dissimilar joint interface of AA5083 and HSLA steel welded by FSW technique",Intermetallics 151 (2022) 107734.

27-M. Du, W. Wang, X. Zhang, J. Niu,"Effect of process parameters on performance of TWIP steel/ Al alloy dissimilar metals butt joints by laser offset welding", Materials science and engineering:A 853 (2022) 143746.

28-M. Saleh, H. Liu, K. Ushioda, H. Fujii,"Effect of Zn interlayer on friction stir butt welding of A1100 and SUS316L stainless steel", Science and technology of welding and joining 27 (2022) 361-373.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.06]