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

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

Volume 10, Number 1, 2024



The dissimilar joint of AISI 316L austenitic stainless steel to 5083 aluminum alloy by friction stir welding and investigation of its microstructure and mechanical properties

M.R Borhani*, S.R Shoja-Razavi, F. Kermani
Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology.

Received 11 April 2023 ; Accepted 23 August 2023

Abstract

In this study, the effects of friction stir welding (FSW) parameters on the properties of dissimilar joints formed between 5083 aluminum alloys and 316L austenitic stainless steel, with a thickness of 4 mm, are investigated. The tool speed is varied in the range of 16 to 25 mm/min, while the tool rotation speed is maintained at a constant value of 250 rpm. To examine the microstructure of different weld regions, both optical and scanning electron microscopes are employed. To assess the mechanical properties, hardness and tensile tests are conducted. The results shows the formation of a composite region characterized by steel reinforcement particles dispersed within an aluminum matrix. At the steel-aluminum interface, a single layer of discontinuous intermetallic composition with a thickness of approximately 2 micrometers is observed. Notably, when the rotation speed is set to 250 rpm and the tool speed is 16 mm/min, a tensile strength of 298 MPa and ductility of 26% (93% of the tensile strength and 50% of the ductility of the 5083 aluminum alloy) are achieved.

Keywords: Dissimilar Joint, 316 Austenitic Stainless Steel, 5083 Aluminum Alloy, Friction Stir Welding, Microstructure, Mechanical Properties..

*Corresponding Author: M.R Borhani, moh_borhani@mut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دهم، شماره1، بهار و تابستان 1403

اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L به آلیاژ آلومینیوم 5083 به روش اصطکاکی اغتشاشی و بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آن

محمدرضا برهانی*، سیدرضا شجاع رضوی، فرید کرمانی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت.

دریافت مقاله: 1402/01/22 ؛ پذیرش مقاله: 1402/06/01

چکیده

در این پژوهش اثر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) بر خصوصیات اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم 5083 و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L، به ضخامت 4 میلی‌متر بررسی شده است. سرعت پیشروی ابزار در محدوده 16 تا 25 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخش ابزار برابر با سرعت ثابت 250 دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. جهت بررسی ریزساختار مناطق مختلف جوش، میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی و جهت بررسی خواص مکانیکی، آزمون‌های سختی و کشش انجام‌شد. نتایج، تشکیل یک منطقه کامپوزیتی متشکل از ذرات تقویت‌کننده فولادی در زمینه ریزدانه آلومینیوم در منطقه اغتشاشی را نشان‌داد. در فصل مشترک فولاد و آلیاژ آلومینیوم، یک‌لایه ترکیب بین فلزی ناپیوسته به ضخامت حدود 2 میکرومتر مشاهده شد؛ همچنین با انتخاب سرعت چرخش 250 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه، استحکام کششی برابر با 298 مگاپاسکال و انعطاف 26 درصد (93 درصد استحکام کششی و 50 درصد انعطاف‌پذیری آلیاژ آلومینیوم) به دست آمد.

کلمات کلیدی: اتصال غیرهمجنس، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L، آلیاژ آلومینیوم 5083، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ریزساختار، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: محمدرضا برهانی، moh_borhani@mut.ac.ir

1- مقدمه

آلومینیوم 5083 یک آلیاژ رسوب‌سخت‌شونده با عناصر اصلی منیزیم و منگنز (این عناصر منجر به تقویت محلول جامد این آلیاژ و افزایش استحکام قابل توجه نسبت به سایر آلیاژهای آلومینیوم می‌شود) است؛ شکل‌پذیری، جوش‌پذیری و مقاومت به خوردگی مناسب، هدایت حرارتی و استحکام ویژه بالا، باعث کاربرد گسترده این آلیاژ به‌صورت تجاری در محیط‌های دریایی، خودروسازی و صنایع شیمیایی شده است[2-1]. فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L دارای خواص مکانیکی مناسب است و به‌دلیل حضور 2 درصد مولیبدن در ترکیب فولاد، مقاومت به خوردگی حفره‌ای عالی در محیط دریایی نشان می‌دهد [4-3]. اتصال آلیاژ آلومینیوم به فولاد زنگ‌نزن باعث کاهش وزن و به‌نوبه خود موجب افزایش بازدهی و کاهش مصرف سوخت می‌شود. همچنین این عمل، مقاومت به سایش، خوردگی و استحکام ویژه بالا از یک فلز و قابلیت هدایت حرارتی، مقاومت به خوردگی و وزن کم از فلز دیگر را به دنبال دارد [6-5]. به‌رغم اینکه اتصال آلومینیوم به فولاد ایده‌آل و توسعه فناوری چنین اتصالی بسیار مطلوب است؛ تشکیل ترکیبات بین فلزی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]

در فصل مشترک دو آلیاژ می‌تواند مشکل‌ساز باشد. برای ایجاد اتصال بی‌نقص آلومینیوم / فولاد، ضروری است که حرارت ورودی جوش در حداقل مقدار خود نگه داشته شود. درنتیجه روش‌های‌اتصال‌حالت‌جامد مانند جوش‌اصطکاکی و جوشکاری فراصوتی موردتوجه قرارگرفته‌اند [8-7].

هریک از این روش‌ها محدودیت‌هایی دارند؛ به‌عنوان‌مثال، جوشکاری اصطکاکی فقط به قطعات استوانه‌ای محدود می‌شود. همچنین در جوشکاری فراصوتی، ضخامت قطعات می‌بایست از حد معینی کمتر باشد [8]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از فرایندهای حالت جامد است که می‌تواند برای اتصال فلزات غیرهم‌جنس به‌کاررود. درمورد اتصال فلزات غیرهم‌جنس به‌وسیله این روش، تحقیقات زیادی صورت گرفته‌است. به‌عنوان‌مثال اتصال آلیاژهای مختلف آلومینیوم، آلومینیوم به مس و آلیاژهای مختلف آلومینیوم به فولاد را می‌توان نام برد[12-9].

تاناکا و همکاران [13] اتصال غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم 6061 به فولاد آستنیتی را موردبررسی قراردادند؛ نتایج نشان‌داد خواص مکانیکی اتصال تحت تأثیر ضخامت لایه بین فلزی تشکیل‌شده بین فولاد و آلومینیوم است؛ به‌گونه‌ای که با افزایش ضخامت لایه بین فلزی، استحکام جوش کاهش می‌یابد همچنین تحقیقات کریمی و همکاران[14] بر روی خواص جوش اصطکاکی اغتشاشی فولاد کربنی 1045 به آلیاژ آلومینیوم 1100 نشان می‌دهد تشکیل حفرات و حضور ذرات فولادی درشت در منطقه اغتشاشی موجب کاهش استحکام اتصال خواهد شد.

بیگی و همکاران [15] به بررسی رفتار شکست اتصال فولاد کربنی و آلومینیوم 1050 به‌صورت تجربی و عددی پرداختند؛ نتایج حاکی از وجود ترک‌های ریز در فصل مشترک FeAl-Al است. به‌نظر می‌رسد در طول خنک‌سازی پس از FSW به‌دلیل ضرایب مختلف انبساط حرارتی رخ داده‌است؛ این ترک‌ها در حین آزمون کشش منتشر می‌شوند و باعث کاهش انرژی شکست و استحکام کششی می‌شوند.

موهان و همکاران [16] به بررسی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیرهم‌جنس آلومینیوم 5052 و فولاد زنگ‌نزن X12Cr13 پرداختند؛ نتایج حاکی از وجود یک اتصال بدون نقص با سرعت چرخش 750 دور در دقیقه است. گرمایش درجا باعث افزایش ازدیاد طول می‌شود و به‌طور قابل‌توجهی استحکام اتصال را بهبود می‌بخشد. همچنین با توجه به سطح شکست، برش موضعی قابل‌مشاهده است که ناشی از تغییر شکل‌های پلاستیک است. همچنین ساختار دانه‌بندی ریز در ناحیه قطعه اتصال منجر به تغییر شکل پلاستیک شدید در ناحیه اتصال شده‌است. به‌رغم کاربردو مزایای‌عالی اتصال غیرهم‌جنس فولاد-آلومینیوم فعالیت پژوهشی صورت گرفته در زمینه اتصال غیرهم‌جنس آلومینیوم-فولاد توسط FSW محدود است؛ در این پژوهش به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم 5083 و فولاد 316L با هدف بهینه‌سازی سرعت پیشروی ابزار و دستیابی به ساختار بدون عیب مورد استفاده در سیستم حمل و نقل پرداخته‌شده است.

2-مواد و روش تحقیق

2-1-نمونه‌ها

در این پژوهش از آلیاژهای آلومینیوم 5083 و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L آنیل شده به ابعاد mm^3 5×50×200 استفاده شد. ترکیب شیمیایی این دو آلیاژ در جدول(1) آورده شده است. عملیات برش‌کاری به‌گونه‌ای انجام شد که جوشکاری در راستای عمود بر جهت نورد ورق‌ها انجام شود.

2-2-تجهیزات فرایند جوشکاری FSW

به‌منظور جوشکاری نمونه‌ها از دستگاه فرز عمودی یونیورسال با توان 7 اسب بخار و توان موتور محرک میزکار 2 اسب بخار با توانایی ایجاد سرعت پیشروی 30 تا 600 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخش 40 تا 2000 دور در دقیقه استفاده شد. در این پژوهش از فیکسچر جوشکاری با جنس فولاد CK45 استفاده شد.

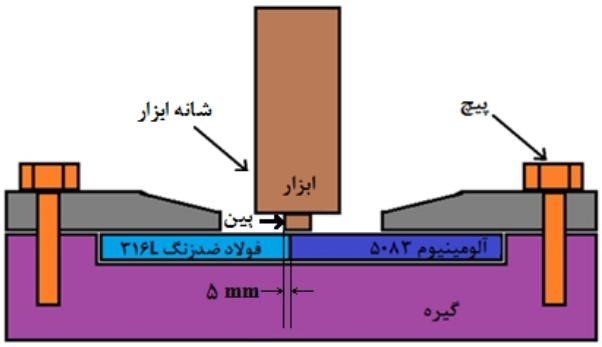
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]

جدول 1- ترکیب شیمیایی فلز پایه و پرکننده برحسب درصد وزنی.

آلومینیم ۵۰۸۳	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
	۰٫۵۵	۰٫۴	۰٫۱۰	۰٫۷	۴٫۵	۰٫۱۵	۰٫۲۵	۰٫۱۵	base
فولاد ۳۱۶L	C	Mn	N	Si	Cr	Ni	Mo	Ti	Fe
	۰٫۰۵	۲	۰٫۰۵	۰٫۸	۱۸	۱۳	۲٫۵	۰٫۰۵	base

ابزار جوشکاری مورداستفاده از جنس فولاد گرم کار H13 با سختی HRC¬54 است. شکل(1) طرح‌واره هندسه اتصال را نشان می‌دهد. قطر شانه ابزار، قطر پین و طول آن به ترتیب 15، 4 و 3/9 میلی‌متر انتخاب شد (شکل 2). جهت اطمینان از تماس کامل شانه ابزار با سطح قطعه کار، زاویه ابزار نسبت به محور عمود سه درجه انتخاب شد. آلیاژ آلومینیوم AA5083 در سمت پیش‌ران و فولاد زنگ‌نزن 316 در سمت پس‌ران قرار گرفت و قطعات در حالت سربه‌سر جوشکاری شدند. علاوه بر این با توجه به منابع مطالعاتی [18-16] و نیز جلوگیری از سایش ابزار جوشکاری و گرم شدن بیش‌ازحد آلیاژ آلومینیوم، فرایند جوشکاری به‌گونه‌ای اجرا شد که قسمت عمده پین ابزار در آلیاژ آلومینیوم 5083 باشد و تنها به اندازه 0/05 mm به درون فولاد زنگ‌نزن 316L وارد شود.



شکل 1- طرح‌واره‌ای از گیره مورداستفاده و هندسه اتصال.

قبل از اجرای فرایند جوشکاری، جهت زدودن اکسیدهای سطحی، محل اتصال توسط برس سیمی، برس‌زنی شد. به‌منظور چربی‌زدایی، نمونه‌ها با استون تمیزکاری نهایی و بلافاصله فرایند جوشکاری به اجرا درآمد. در طی این پژوهش با توجه به توانایی دستگاه و بررسی اولیه انجام شده روی دو آلیاژ، سرعت چرخش ابزار برابر با 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی آن 16، 20 و 25 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد.

2-3-بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال

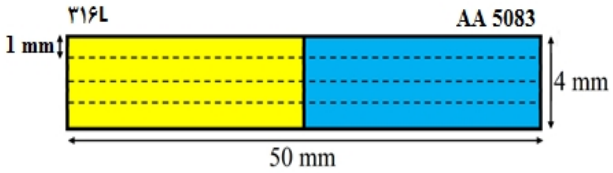
جهت تعیین خواص مکانیکی اتصال حاصل، از آزمون کشش و ریزسختی‌سنجی استفاده شد. بدین منظور، نمونه‌های کشش عمود بر جوش مطابق با استاندارد ASTM A370 [19] تهیه و از دستگاه کشش Zwick Z250 با سرعت کشش فک 0/25 میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد.



قطر پین : 4 میلی‌متر
طول پین: 9/3 میلی‌متر
قطر ابزار: 15 میلی‌متر

شکل 2- تصویر ابزار ساخته‌شده.

جهت بررسی تغییرات سختی در عرض جوش آزمون ریزسختی سنجی مطابق استاندارد ASTM E384 [20] از عرض‌سطح مقطع نمونه‌ها انجام شد. بدین‌منظور مطابق شکل(3)، سه خط به فاصله 1، 2 و3 میلی‌متر از سطح ورق انتخاب شده و تغییرات سختی مناطق مختلف و فاصله 500 میکرومتر، با استفاده از دستگاه ریزسختی سنجی مدل Buehler Micromet 5101 و بار 300 گرم بررسی شد.



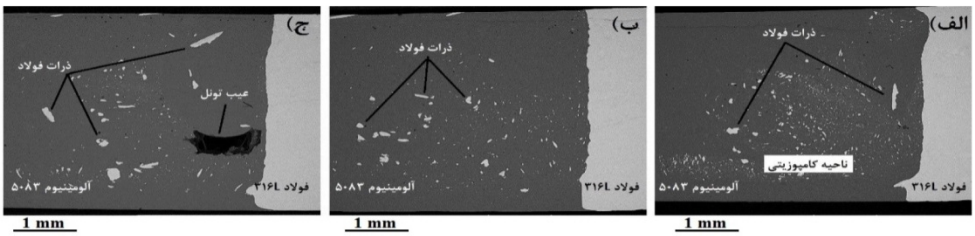
شکل 3- طرح‌واره اندازه‌گیری پروفیل سختی از مقطع عرضی جوش.

به‌منظور بررسی ریزساختار جوش حاصل، نمونه‌هایی در ابعاد 4×30 میلی‌متر از سطح مقطع جوش برش داده و مانت شدند. پس از سنباده‌زنی با پودر آلومینا با اندازه ذره0/3 میکرومتر پولیش شدند. درنهایت فولاد زنگ‌نزن 316L و آلیاژ آلومینیوم

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]

جدول 2- ترکیب شیمیایی محلول‌های حکاکی مورداستفاده در این پژوهش [21]

محلول حکاکی	ترکیب شیمیایی (درصد حجمی)		
محلول کالینگ	$CuCl_2$	HCl	C_2H_5OH
	5 g	100 cc	100 cc
محلول وک	$KMnO_4$	NaOH	H_2O
	4 g	1 g	100 cc



زمینه		ذرات الف		ذرات ب	ذرات ج
Al	۹۳/۴	Fe	۶۴/۴	۶۴	۶۴
Mg	۴/۷	Mn	۲/۲	۲/۲	۲/۲
Mn	۰/۷	Si	۰/۸	۰/۸	۰/۹
Si	۰/۵	Cr	۱۶	۱۶/۳	۱۶
Zn	۰/۳	Ni	۱۴	۱۴	۱۴/۲
Fe	۰/۴	Mo	۲/۶	۲/۷	۲/۷

شکل4- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و آنالیز طیف سنجی پراش انرژی از مقطع جوش در سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی الف- 16، ب- 20 و ج- 25 میلی‌متر بر دقیقه.

5083 به‌ترتیب با استفاده از محلول کالینگ و محلول وک حکاکی شدند (جدول 2). به‌منظور بررسی ریزساختار نواحی مختلف اتصال حاصل از میکروسکوپ‌های نوری Nikon Epiphot 300 و الکترونی روبشی Phillips XI30 مجهز به سیستم آنالیز طیف‌سنجی توزیع انرژی (EDS) استفاده شد.

3-نتایج و بحث

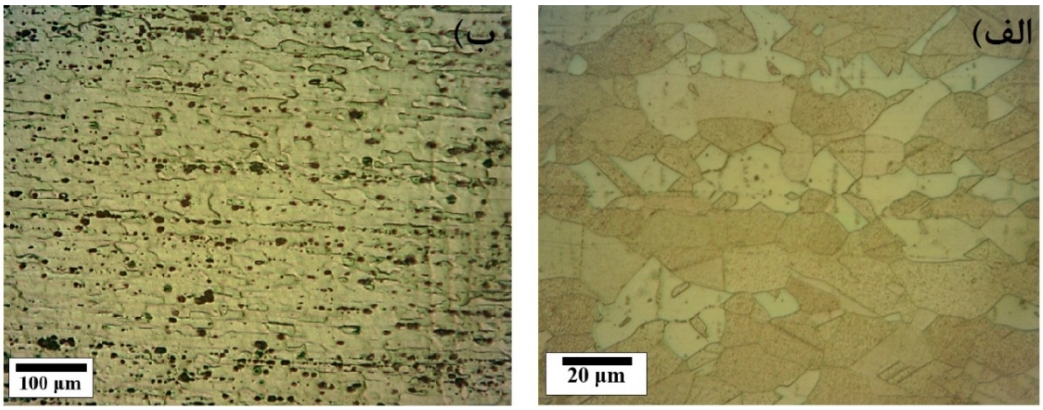
3-1-ریزساختار

در شکل(4) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع جوش نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 16، 20 و 25 میلی‌متر بر دقیقه آورده شده‌است. با توجه به نتایج آنالیز طیف‌سنجی انرژی، فصل مشترک بین آلیاژ آلومینیوم 5083 (تیره‌رنگ) و فولاد 316L (به رنگ روشن)، تقریباً به‌صورت یک خط صاف و عمودی است.

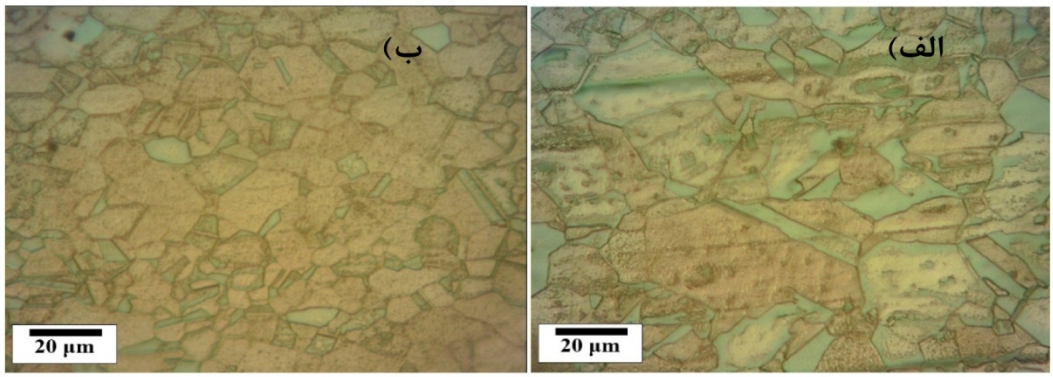
این امر نشان می‌دهد که در فصل مشترک دو آلیاژ، رقت تنها در مقیاس میکروسکـــوپی صـورت گرفته است. این امر به دلیل آن است که پین عمدتاً در قسمت پیش‌ران (سمت آلومینیوم) به گردش درآمده و به میزان کمی، در حدmm 0/05 به درون فولاد نفوذ کرده و بنابراین رقت در مقیاس ماکروسکوپی صورت نگرفته است. به‌علاوه در هر سه نمونه، منطقه اغتشاشی به‌صورت یک ناحیه کامپوزیتی است. در این ناحیه براثر حرکت چرخشی و انتقالی پین، ذرات فولاد از فصل مشترک جدا شده و به درون ناحیه اغتشاشی راه‌یافته‌اند؛ بنابراین ناحیه اغتشاشی، شامل یک زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با ذرات فولادی است.

با بررسی شکل‌های(4-الف تا 4-ج) ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت پیشروی ابزار سه پدیده رخ داده است؛ اولاً، تعداد ذرات فولادی کاهش‌یافته، دوماً، حجم آن‌ها افزایش‌یافته و ثالثاً توزیع آن‌ها ناهمگن‌تر شده است. با دقت در شکل(4-ج) ملاحظه می‌شود که در قسمت پیش‌ران (آلیاژ آلومینیوم) در منطقه اغتشاشی عیب تونل به وجود آمده است. با توجه به منابع این عیب در اثر انتخاب نادرست پارامترهای جوشکاری مانند سرعت پیشروی زیاد یا سرعت چرخش کم به وجود می‌آید [13-10].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]



شکل5- تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار فلز پایه الف- فولاد زنگ‌نزن L 316و ب- آلیاژ آلومینیوم 5083.



شکل6- الف- تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن 316L
و ب- ریزساختار نزدیک به منطقه اغتشاشی در فولاد زنگ‌نزن 316L.

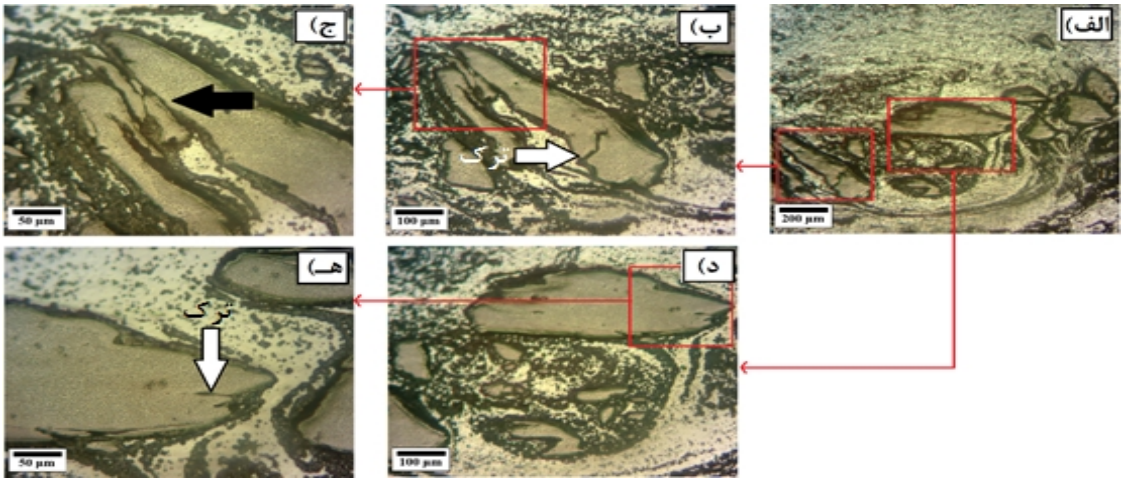
در شکل(5-الف و 5-ب)، به ترتیب ریزساختار فلزپایه فولاد زنگ‌نزن 316L و آلومینیوم 5083، نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، فولاد زنگ‌نزن شامل دانه‌های هم‌محور با اندازه متوسط 25 میکرومتر است. از سوی دیگر ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 5083 شامل دانه‌های کشیده شده با طول قطر در حدود 80 تا 150 میکرومتر است.

ریزساختار منطقه متأثر از حرارت (HAZ)، سمت پس‌ران (فولاد 316L)، در شکل(6-ب) نشان داده شده است. در این منطقه اندازه دانه اندکی افزایش پیدا کرده است. با مقایسه شکل(6-الف و 6-ب)، ملاحظه می‌شود مورفولوژی دانه‌ها در این منطقه، تغییر کرده‌است. در شکل(6-الف)، دانه‌ها به‌صورت هم‌محور است و تقریباً در تمام ریزساختار، زاویه مرزدانه حدود 120 درجه است. با بررسی شکل(6- الف) مشخص می‌شود که در برخی نقاط زاویه مرزدانه‌ها تغییر کرده و دانه‌ها شکل نامنظمی به خود گرفته‌اند.

این امر به دلیل تأثیر حرکت چرخشی پین بر ریزساختار فولاد است. در شکل(6-الف) ریزساختار فولاد در نزدیکی فصل مشترک نشان داده‌شده است. هرچند این ناحیه در معرض حرارت ناشی از جوشکاری قرارگرفته و می‌بایست در آن رشد دانه رخ‌داده باشد؛ اما به دلیل حرکت چرخشی پین، برخی دانه‌ها شکسته شده و درنتیجه مانع از رشد دانه‌های مجاور شده‌اند. نتایج مشابهی با این پدیده در تحقیق لیو و همکاران [3] مشاهده شده است. به‌هرحال، مشاهدات نشان داد که عرض این ناحیه و ناحیه متأثر از حرارت بسیار ناچیز و در حدود 500 میکرومتر است.

در شکل(7)، قسمتی از ریزساختار منطقه اغتشاشی (منطقه کامپوزیتی) نمونه با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 20 میلی‌متر بر دقیقه آورده شده است. همان‌طور که در شکل(7-الف) ملاحظه می‌شود ذرات فولادی در اندازه و اشکال مختلف در ساختار توزیع‌شده‌اند. از مشاهده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]

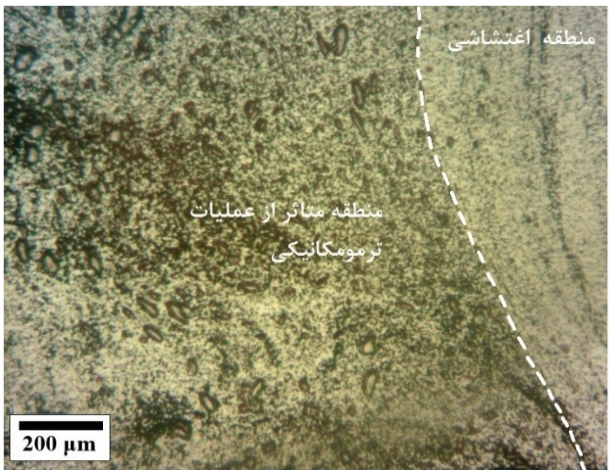


شکل 7- تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار منطقه کامپوزیتی نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 20 میلی‌متر بر دقیقه الف- قسمتی از منطقه اغتشاشی، ب-هـ- تصاویر متناظر با بزرگنمایی بالاتر.

این ذرات چندین نکته دریافت می‌شود؛ اولاً شکل ذرات نامنظم است. این به معنای آن است که ذرات فولادی به همان شکلی که از فصل مشترک جداشده‌اند وارد منطقه اغتشاش شده‌اند و چرخش ابزار نتوانسته شکل آن‌ها را تغییر دهد. دوماً چنانچه هندسه این ذرات پس از جدا شدن از فصل مشترک تغییر کرده باشد، به‌احتمال‌زیاد به‌واسطه ایجاد ترک در آن‌ها و سپس اشاعه ترک در اثر نیروی حاصل از چرخش پین بوده است.

شکل(7-ب و 7-ه) تایید کننده این ادعا است.(ترک‌های مویی با پیکان‌های سفید مشخص‌شده‌اند.) نکته سومی که از تمامی تصاویر دریافت می‌شود آن است که این ذرات در جهت سیلان زمینه آلومینیومی آرایش پیداکرده‌اند. این امر به آن دلیل رخ می‌دهد که ذرات فولادی می‌بایست خود را به‌گونه‌ای آرایش دهند که کمترین مقاومت در برابر سیلان ماده (آلیاژ آلومینیوم) ایجاد شود.

در شکل(8)، ریزساختار منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ)، نمونه با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه، نشان داده شده است. (مرز بین منطقه اغتشاشی و منطقه TMAZ توسط خط‌چین نشان داده شده است) ریزساختار ناحیه TMAZ شامل ذرات ریز (در حد 20 میکرومتر) فولادی است که در جهت سیلان ماده آرایش یافته‌اند. نرخ کرنش در این ناحیه بالاست، ولی سیکل دمایی به‌گونه‌ای نیست که بتواند منجر به تبلور مجدد دینامیکی شود. در پژوهشی توسط ما و همکاران [22] توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نشان داده‌شده است که در این ناحیه مرزهای فرعی تشکیل شده و چگالی بالایی از نابجایی‌ها به وجود می‌آید که تایید کننده این ادعا است.

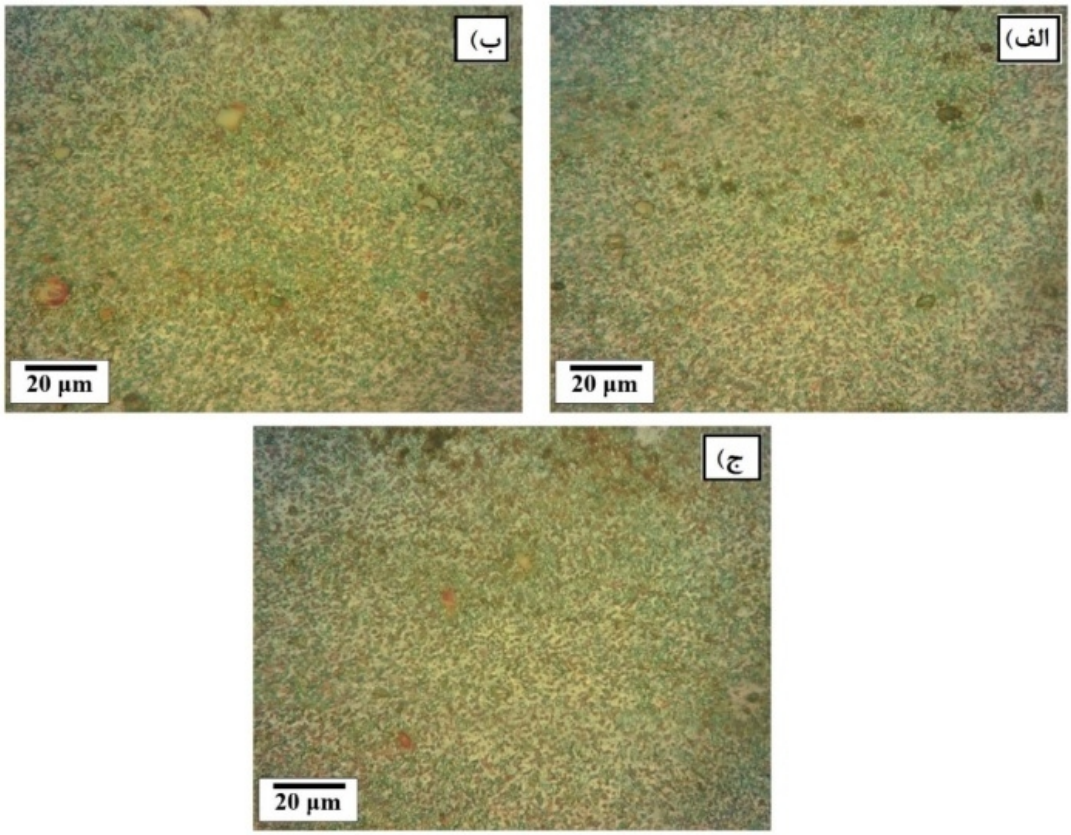


شکل 8- تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ریزساختار این قسمت شامل دانه‌های هم‌محور است که در اثر تبلور مجدد دینامیکی به وجود آمده‌اند. با توجه به شکل(9-الف الی 9-ج) مشاهده می‌شود در این پژوهش، دانه‌بندی در منطقه اغتشاشی وابستگی چندانی به‌سرعت خطی نداشته و اندازه دانه‌ها در حدود 1 تا 10 میکرومتر است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]



شکل9- تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار منطقه اغتشاشی نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخش

در شکل(10) ریزساختار قسمتی از ناحیه اغتشاشی نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 25 میلی‌متر در دقیقه را نشان می‌دهد. در منطقه اغتشاشی این نمونه به دلیل حرارت ورودی کم، سیلان مواد به گونه مؤثر رخ نداده‌است و درنتیجه عیب تونل به وجود آمده است. با توجه به پژوهش ایلانگووان و همکاران[23]، عیب تونل به دلیل هندسه نامناسب ابزار، سرعت پیشروی بالا و یا سرعت چرخش کم رخ می‌دهد. ریزساختار منطقه اغتشاشی نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت‌های پیشروی به ترتیب برابر با 16، 20 و 25 میلی‌متر بر دقیقه در شکل(11-الف الی 11-ج) نشان داده‌شده است. در شکل(11-الف)، تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 25 میلی‌متر بر دقیقه آورده شده است. قسمتی از فصل مشترک اتصال که با دایره قرمزرنگ‌مشخص‌شده، نیزدر شکل(11-ب) نشان‌داده‌شده است. مشاهدات در نقاط مختلف فصل مشترک دو آلیاژ در محل اتصال نشان داد که هیچ لایه بین فلزی پیوسته‌ای در فصل مشترک ایجاد نشده است. ولی در برخی نقاط یک‌لایه نازک به عرض حدود 2 میکرومتر در فصل مشترک به وجود آمده است. همچنین مشاهدات نشان داد که هیچ‌گونه ناپیوستگی در فصل مشترک وجود ندارد و فصل مشترک اتصال عاری از این عیب است.

3-2-رفتار مکانیکی

شکل(12) تصویر نمونه‌های کشش عرضی از مقطع جوش را نشان می‌دهد. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت‌های پیشروی 16، 20 و 25 میلی‌متر بر دقیقه در شکل(13) آورده شده است. با توجه به شکل(13)، مشخص است که استحکام نهایی تمامی نمونه‌ها از هر دو فلزپایه فولاد زنگ‌نزن 316L و آلومینیوم 5083 کمتر است. به‌علاوه نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]

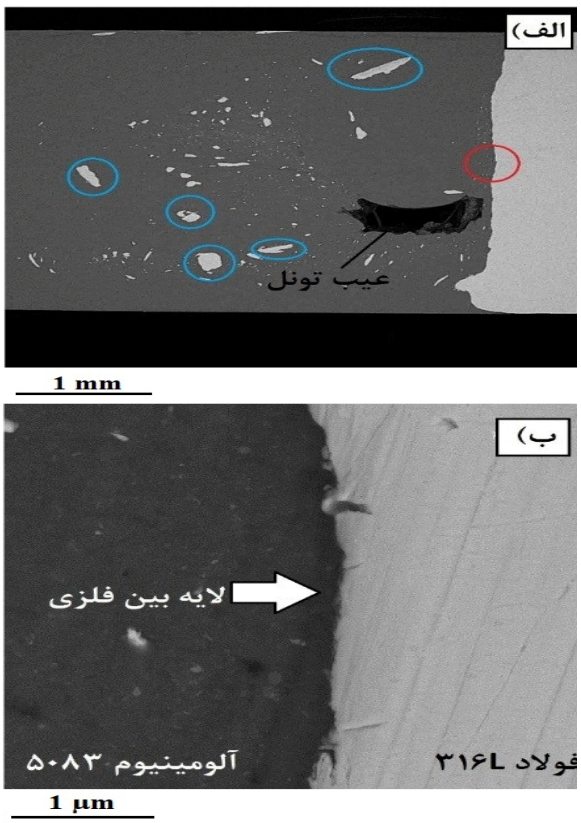
استحکام کششی برابر با 298 MPaو انعطاف‌پذیری 26 درصد ازمنطقه HAZ سمت‌پیشران (آلیاژ آلومینیوم) و نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی 20 میلی‌متر بر دقیقه با استحکام کششی برابر با 110 MPaو انعطاف‌پذیری 32 درصد درست از نزدیکی فصل مشترک جوش و از سمت پیش‌ران شکسته شده است. با این‌حال، نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی 25 میلی‌متر بر دقیقه با استحکام کششی برابر با 35 MPa و انعطاف‌پذیری 3 درصد از فصل مشترک دو آلیاژ گسیخته شده است.



شکل 10- تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار قسمتی از ناحیه اغتشاشی نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 25 میلی‌متر بر دقیقه (نشان دهنده عیب تونلی شدن).

در نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی 25 میلی‌متر بر دقیقه، به دلیل وجود عیب تونل و درنتیجه کاهش سطح مقطع مؤثر اتصال، استحکام و انعطاف‌پذیری جوش به‌شدت افت کرده است. همان‌طور که در شکل(11) ملاحظه شد، تونل ایجاد شده، دارای گوشه‌های تیز است که این امر اثر، مضاعفی بر کاهش استحکام جوش خواهدداشت. با توجه به منابع این گوشه‌های تیز به‌عنوان نقاط تمرکز تنش مطرح هستند [24]. علاوه‌براین همان‌طور که در شکل(4) مشاهده می‌شود، توزیع ذرات تقویت‌کننده فولاد در این نمونه نسبت به دیگر نمونه‌ها از یکنواختی کمتری برخوردار بوده و علاوه بر آن تعداد ذرات نیز کمتر از دو نمونه دیگر است. به همین دلیل در مقایسه با دو جوش دیگر، استحکام منطقه اغتشاشی بسیار کمتر خواهد بود.

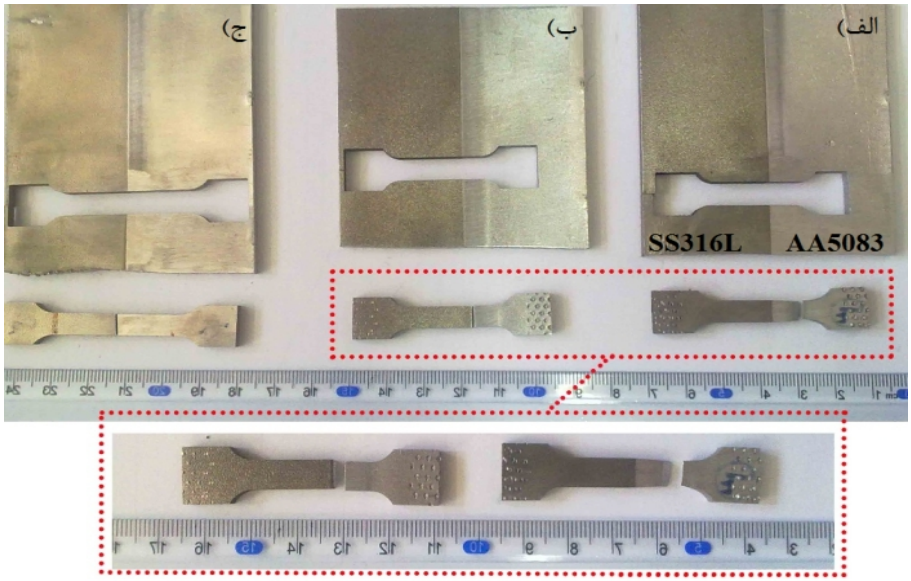
هرچند در نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی20 میلی‌متر بر دقیقه، مشابه با نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه، عیب‌تونل مشاهده نمی‌شود، ولی استحکام این جوش (110MPa) حدود یک‌سوم استحکام کششی جوشکاری شده با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه (298 MPa) است. این تفاوت شدید در استحکام را می‌توان به‌اندازه (حجم) ذرات تقویت‌کننده و نحوه توزیع آن‌ها نسبت داد. همچنین با توجه به کاهش ذرات و عدم وجود عیب تونل در این نمونه انعطاف‌پذیری بالاتر از نمونه با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه (26 درصد) است. مطالعات ژانگ و همکاران [25] و چن و همکاران [26] نشان می‌دهند که با یکنواخت‌تر شدن توزیع ذرات تقویت‌کننده (فولاد) استحکام مکانیکی بالاتری حاصل خواهدشد.



شکل 11- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی الف- منطقه اغتشاشی نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 25 میلی‌متر بر دقیقه و ب- منطقه مشخص‌شده با دایره قرمز در شکل الف با بزرگنمایی بیشتر.

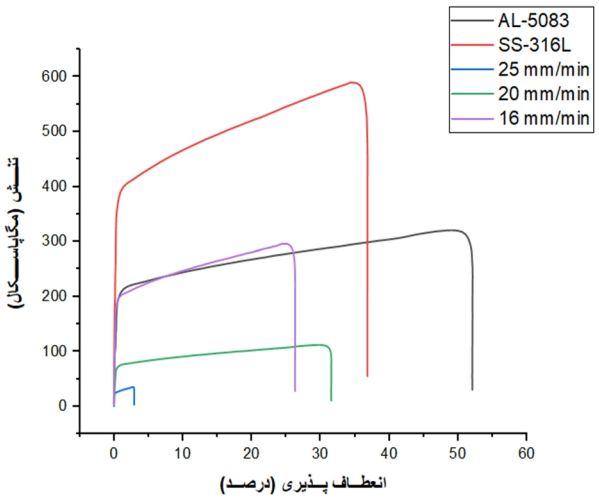
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]



شکل 12- نمونه‌های کشش ایجادشده از جوش اصطکاکی اغتشاشی غیرهمجنس فولاد زنگ‌نزن 316L و آلومینیوم 5083 ایجادشده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی؛ الف- 16، ب- 20 و ج- 25 میلی‌متر بر دقیقه.

برای ارزیابی تغییرات سختی در مقطع اتصال از آزمون سختی‌سنجی ویکرز استفاده شد. پروفیل سختی نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 16 و 20 میلی‌متر بر دقیقه در شکل(14) آورده شده است. با مقایسه شکل(14-الف و 14-ب) مشخص می‌شود که شکل کلی نمودار در هر دو نمونه تقریباً یکسان است. در سمت پس‌ران (فولاد زنگ‌نزن 316L)، تغییرات سختی از فلزپایه تا فصل مشترک اتصال بسیار ملایم است. در قسمت HAZ و TMAZ سمت پس‌ران، سختی به‌آرامی افزایش یافته است. این افزایش در میزان سختی به‌دلیل کرنش سختی و ریز شدن دانه‌ها در این ناحیه از اتصال است. ریزشدن دانه‌ها در این منطقه در شکل(9)، به وضوح مشاهده‌می‌شود. با مقایسه نمودار شکل(14-الف و 14-ب) ملاحظه می‌شود که با کاهش سرعت پیشروی ابزار، متوسط سختی منطقه HAZ و TMAZ پس‌ران افزایش یافته است. این امر به دلیل آن است که با کاهش سرعت پیشروی (افزایش w/v)، در این نواحی اغتشاش بیشتری رخ داده است؛ بنابراین اندازه دانه‌ها به میزان بیشتری کاهش پیدا کرده و درنتیجه طبق رابطه معروف هال-پچ [27]، سختی و استحکام افزایش یافته است. با مشاهده نمودار شکل(14-الف و 14-ب) ملاحظه می‌شود که ماکزیمم مقدار سختی مربوط به فصل مشترک اتصال است. این مسئله به‌دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی با سختی بالا در این منطقه است. به‌طور مشابه در تحقیق واتانابل و همکاران [18] این مسئله مشاهده شده‌است. در منطقه اغتشاشی (نواحی کامپوزیتی در شکل 4)، سختی به‌صورت تدریجی افزایش یافته است. این رویداد به دو دلیل رخ داده است.

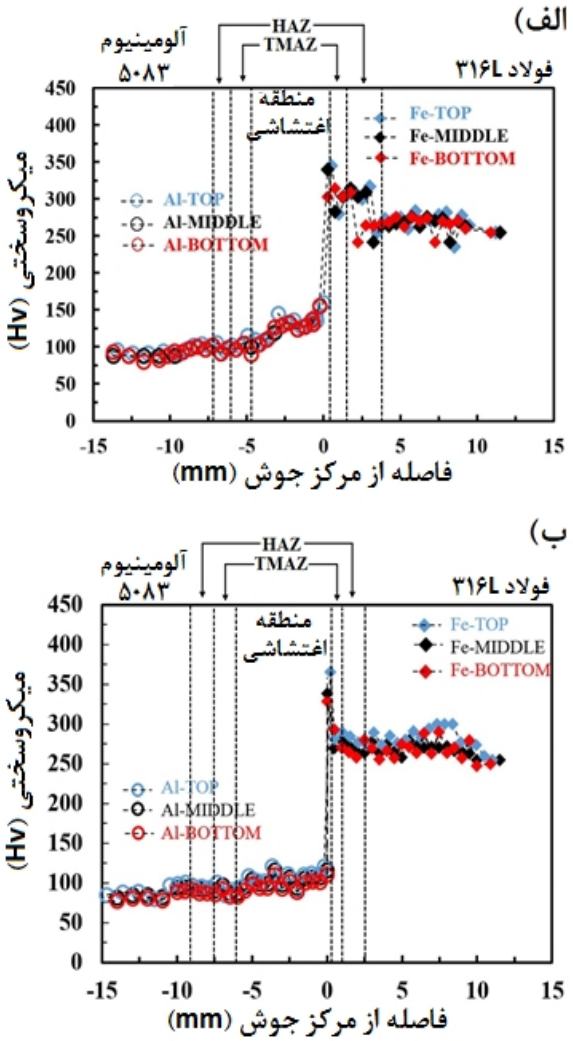


شکل13- نمودار تنش-کرنش فلزات پایه و نمونه‌های جوشکاری شده.

اولاً با توجه به شکل(9)، در این منطقه دانه‌ها به شدت ریز شده‌اند و درنتیجه سختی افزایش یافته و دوماً ساختار به‌صورت یک کامپوزیت با ذرات تقویت‌کننده فولادی تبدیل می‌شود. با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]

مقایسه شکل‌های(14-الف و 14-ب)، ملاحظه شد که با کاهش سرعت پیشروی ابزار از 20 به16 میلی‌متر بر دقیقه، روند تغییرات در پروفیل سختی ملایم‌تر شده است. در منطقه اغتشاشی شکل(14-الف)، پروفیل سختی نوسان زیادی به خود گرفته است. ازآنجاکه در روش سختی سنجی ویکرز، فرورونده نقطه اثر ناچیزی بر جای می‌گذارد، بنابراین پروفیل سختی حاصل شدیداً تحت تأثیر ناهمگونی‌های ساختاری است. به دلیل آنکه با کاهش سرعت پیشروی توزیع ذرات فولاد در منطقه کامپوزیتی همگن‌تر شده، پروفیل سختی حاصل نیز دچار نوسانات کمتری شده است.



شکل14- پروفیل سختی مقطع جوش در سه سطح بالا، وسط و پایین در نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی الف- 16 و ب- 20 میلی‌متر در دقیقه.

سطح مقطع شکست نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 16، 20 و 25 میلی‌متر بر دقیقه در شکل(15-الف الی 15-ج) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی ابزار، رفتار شکست از حالت کاملاً نرم به شکست تقریباً ترد تبدیل شده‌است. دیمپل‌های بسیار ریز در شکل(15-الف)، نشان‌دهنده آن است که این نمونه از یک ناحیه ریزدانه و هم‌محور شکسته شده‌است. در نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه، شکست از کنار منطقه اغتشاشی رخ داده است. در شکل(15-ب و 15-ج)، ظاهر نامتعارف شکست نشان دهنده سیلان نامناسب ماده در منطقه اغتشاشی این دو نمونه است. به نحوی که مواد در اثر تغییر شکل پلاستیک ناشی از چرخش پین، به درون یکدیگر ممزوج نشده‌اند.

چنانچه پارامترهای فرایند مانند سرعت چرخش ابزار و سرعت پیشروی بهینه نباشند، مواد مومسان شده، به‌گونه مناسبی سیلان نمی‌کنند و درنهایت ساختار منطقه اغتشاشی حاصل به‌صورت ناپیوسته خواهدبود. درنتیجه می‌توان نتیجه گرفت که در اثر افزایش سرعت پیشروی ابزار و درنتیجه کاهش حرارت ورودی فرایند، سیلان مواد به‌گونه مؤثری رخ نداده است که نتیجه این امر را می‌توان در ظاهر شکست آن مشاهده نمود

4-نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری برریزساختار و خواص مکانیکی جوش غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم 5083 و فولاد زنگ‌نزن 316L پرداخته شد. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان بدین‌صورت خلاصه نمود:

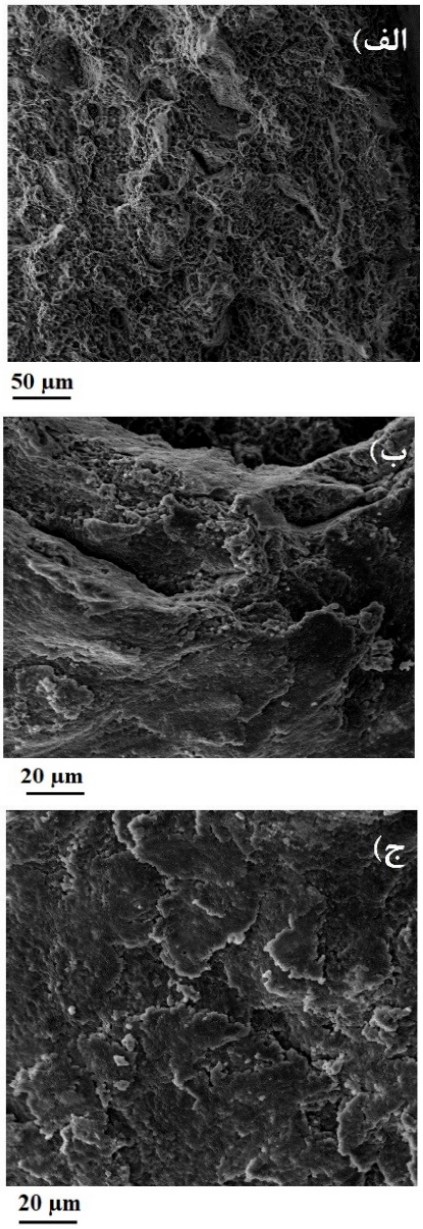
- منطقه اغتشاشی اتصال برخلاف منطقه اغتشاش جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی فلزات مشابه، به‌صورت یک کامپوزیت متشکل از زمینه آلومینیوم همراه با ذرات تقویت‌کننده فولادی است.

- سرعت پیشروی ابزار تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر ریزساختار و خصوصیات مکانیکی جوش اصطکاکی اغتشاشی غیرهمجنس

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]

فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L و آلومینیوم 5083 دارد و با افزایش سرعت پیشروی ابزار از 16 به 25 میلی‌متر بر دقیقه، اندازه ذرات فولادی در منطقه اغتشاش، افزایش می‌یابد و توزیع آن‌ها ناهمگن‌تر می‌شود. با افزایش سرعت پیشروی از 16 به 20 میلی‌متر بر دقیقه پروفیل سختی در مقطع اتصال نشان‌دهنده نوسانات شدیدتری است.



شکل15- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح شکست نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی الف- 16، ب- 20 و ج- 25 میلی‌متر بر دقیقه.

- سرعت پیشروی ابزار تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر ریزساختار و خصوصیات مکانیکی جوش اصطکاکی اغتشاشی غیرهمجنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L و آلومینیوم 5083 دارد و با افزایش سرعت پیشروی ابزار از 16 به 25 میلی‌متر بر دقیقه، اندازه ذرات فولادی در منطقه اغتشاش، افزایش می‌یابد و توزیع آن‌ها ناهمگن‌تر می‌شود. با افزایش سرعت پیشروی از 16 به 20 میلی‌متر بر دقیقه پروفیل سختی در مقطع اتصال نشان‌دهنده نوسانات شدیدتری است.

- نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی16 میلی‌متر بر دقیقه دارای استحکام 298 مگاپاسکال و انعطاف‌پذیری 26 درصد به‌عنوان بهترین نمونه انتخاب شده است.

منابع

1-Rudra, Amitava, et al. "Study of processing map and effect of hot rolling on mechanical properties of aluminum 5083 alloy." Transactions of the Indian Institute of Metals 73 (2020): 1809-1826.

2-Kim, Gwang-Gook, et al. "Mechanical Properties of Aluminum 5083 Alloy GMA Welds with Different Magnesium and Manganese Content of Filler Wires." Applied Sciences 11.24 (2021): 11655.

3-Liu, Xiaoru, et al. "Mechanical property comparisons between CrCoNi medium-entropy alloy and 316 stainless steels." Journal of Materials Science & Technology 108 (2022): 256-269.

4-Olugbade, Temitope, and Jian Lu. "Enhanced corrosion properties of nanostructured 316 stainless steel in 0.6 M NaCl solution." Journal of Bio-and Tribo-Corrosion 5 (2019): 1-11.

5-Jabraeili, Reza, et al. "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.

6-Alimadadi, M., M. Goodarzi, and S. M. A. Boutorabi. "The effect of tool transverse speed on the properties of aluminum-steel dissimilar joint by friction stir welding." Journal of Welding Science and Technology of Iran 7.1 (2021): 41-50.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]

properties and their relation to microstructure." Materials Science and Engineering: A 556 (2012): 175-183.

18-Watanabe, Takehiko, Hirofumi Takayama, and Atsushi Yanagisawa. "Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding." Journal of Materials Processing Technology 178.1-3 (2006): 342-349.

19-ASTM A370-22. " Standard test methods and definitions sor mechanical testing of steel product." ASTM International:2022.

20-ASTM E384 -17, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, 2018.

21-Handbook, A. S. M. "Metallography and microstructures." Edited by GF Vander Voort, ASM Intenational 9 (2004.(

22-Ma, Z. Y., S. R. Sharma, and R. S. Mishra. "Microstructural modification of as-cast Al-Si-Mg alloy by friction stir processing." Metallurgical and Materials Transactions A 37 (2006): 3323-3336.

23-Elangovan, K., and V. Balasubramanian. "Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy." Materials & design 29.2 (2008): 362-373.

24-Pilkey, Walter D., Deborah F. Pilkey, and Zhuming Bi. Peterson's stress concentration factors. John Wiley & Sons, 2020.

25-Zhang, Shucai, et al. "Refinement mechanism of cerium addition on solidification structure and sigma phase of super austenitic stainless steel S32654." Journal of Materials Science & Technology 102 (2022): 105-114.

26-Qin, Yong–Qiang, et al. "Research status and development trend of preparation technology of ceramic particle dispersion strengthened copper-matrix composites." Journal of Alloys and Compounds 848 (2020): 156475.

27-Dieter, Paupler PGE. Mechanical Metallurgy. M c Graw-Hill Book Co., New York 1986. XXIII+ 751 p., DM 138.50. Vol. 23. No. 2. ISBN 0–07–016893–8. Crystal Research and Technology, 1988.

7-Wallerstein, Daniel, et al. "Recent developments in laser welding of aluminum alloys to steel." Metals 11.4 (2021): 622.

8-Atabaki, M. Mazar, et al. "Welding of aluminum alloys to steels: an overview." journal for Manufacturing Science and Production 14.2 (2014): 59-78.

9-Mohan, Dhanesh G., Jacek Tomków, and S. Gopi. "Induction assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials AA5052 aluminium alloy and X12Cr13 stainless steel." Advances in Materials Science 21.3 (2021): 17-30.

10-Sun, Yumeng, et al. "A review of the friction stir welding of dissimilar materials between aluminum alloys and copper." Metals 12.4 (2022): 675.

11-Anvari, Seyedeh Zahra, and Meysam Khandozi. "Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of dissimilar AA2024-AA6061 joints." Journal of Welding Science and Technology of Iran 7.2 (2022): 113-125.

12-Gogheri, M. Sadeghi, et al. "Friction stir welding of dissimilar joint of aluminum alloy 5083 and commercially pure titanium." Journal of Welding Science and Technology of Iran 2 (2016): 49-56.

13-Tanaka, Tsutomu, Taiki Morishige, and Tomotake Hirata. "Comprehensive analysis of joint strength for dissimilar friction stir welds of mild steel to aluminum alloys." Scripta Materialia 61.7 (2009): 756-759.

14-Karimi, Namdar, et al. "Joining of 1100 Al alloy to AISI 1045 carbon steel by friction stir welding." Applied Mechanics and Materials. Vol. 152. Trans Tech Publications Ltd, 2012.

15-Beygi, R., et al. "Design of friction stir welding for butt joining of aluminum to steel of dissimilar thickness: heat treatment and fracture behavior." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 112 (2021): 1951-1964.

16-Liu, Xun, Shuhuai Lan, and Jun Ni. "Analysis of process parameters effects on friction stir welding of dissimilar aluminum alloy to advanced high strength steel." Materials & Design 59 (2014): 50-62.

17-Coelho, R. S., et al. "Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.14]