



# 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](mailto:moh_borhani@mut.ac.ir)



## اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌زن آستینیتی AISI 316L به آلیاژ آلومینیوم 5083 به روش اصطکاکی اغتشاشی و بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی آن

محمد رضا برهانی<sup>\*</sup> (ID)، 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 زنگ‌زن آستینیتی 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 انجام شد. نتایج، تشکیل یک منطقه کامپوزیتی متشکل از ذرات تقویت‌کننده فولادی در زمینه ریزدانه آلومینیوم در منطقه اغتشاشی را نشان داد. 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 زنگ‌زن آستینیتی 316L، آلیاژ آلومینیوم 5083، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ریزساختار، خواص مکانیکی.

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: محمد رضا برهانی، moh\_borhani@mut.ac.ir

### 1- مقدمه

به دلیل حضور 2 درصد مولیبدن در ترکیب فولاد، مقاومت به خوردگی حفره‌ای عالی در محیط دریایی نشان می‌دهد [3-4]. اتصال آلیاژ آلومینیوم به فولاد زنگ‌زن 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 [5-6]. به‌رغم اینکه اتصال آلومینیوم به فولاد ایده‌آل و توسعه فناوری چنین اتصالی بسیار مطلوب است؛ تشکیل ترکیبات بین فلزی

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 [1-2]. فولاد زنگ‌زن آستینیتی 316L دارای خواص مکانیکی مناسب است و

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 کاربرد مزایای عالی 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 پرداخته شده‌است.

## 2- مواد و روش تحقیق

### 2-1- نمونه‌ها

در این پژوهش از آلیاژهای آلومینیوم 5083 و فولاد زنگ‌نزن آستنی 316L آنیل شده به ابعاد  $200 \times 50 \times 5$  mm<sup>3</sup> استفاده شد. ترکیب شیمیایی این دو آلیاژ در جدول (1) آورده شده‌است. 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.

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. در نتیجه روش‌های اتصال‌حالت‌جامد مانند جوش اصطکاکی و جوشکاری فراصوتی مورد توجه قرار گرفته‌اند [7-8].

هریک از این روش‌ها محدودیت‌هایی دارند؛ به‌عنوان مثال، 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 به‌کار رود. درمورد اتصال فلزات غیرهمجنس به‌وسیله این روش، تحقیقات زیادی صورت گرفته‌است. به‌عنوان مثال اتصال آلیاژهای مختلف آلومینیوم، آلومینیوم به مس و آلیاژهای مختلف آلومینیوم به فولاد را می‌توان نام برد [9-12]. تاناکا و همکاران [13] اتصال غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم 6061 به فولاد آستنی را مورد بررسی قرار دادند؛ نتایج نشان‌داد خواص مکانیکی اتصال تحت تأثیر ضخامت لایه بین فلزی تشکیل شده 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.

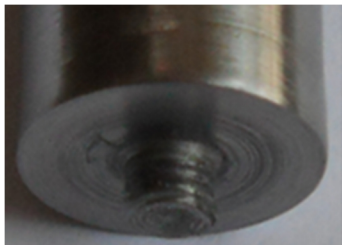
بیگی و همکاران [15] به بررسی رفتار شکست اتصال فولاد کربنی و آلومینیوم 1050 به‌صورت تجربی و عددی پرداختند؛ نتایج حاکی از وجود ترک‌های ریز در فصل مشترک FeAl-Al است. به‌نظر می‌رسد در طول خنک‌سازی پس از FSW به‌دلیل ضرایب مختلف انبساط حرارتی رخ داده‌است؛ این ترک‌ها در حین آزمون کشش منتشر می‌شوند و باعث کاهش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

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

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

### 2-3- بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال

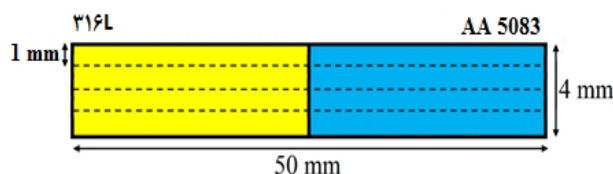
جهت تعیین خواص مکانیکی اتصال حاصل، از آزمون کشش و ریزسختی سنجی استفاده شد. بدین منظور، نمونه‌های کشش عمود بر جوش مطابق با استاندارد ASTM A370 [19] تهیه و از دستگاه کشش Zwick Z250 با سرعت کشش فک 0/25 میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد.



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

شکل 2- تصویر ابزار ساخته‌شده.

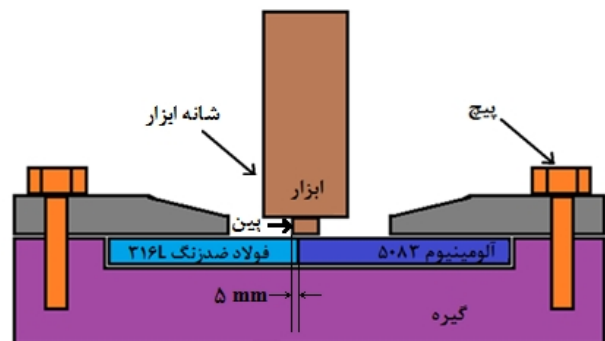
جهت بررسی تغییرات سختی در عرض جوش آزمون ریزسختی سنجی مطابق استاندارد ASTM E384 [20] از عرض سطح مقطع نمونه‌ها انجام شد. بدین‌منظور مطابق شکل (3)، سه خط به فاصله 1، 2 و 3 میلی‌متر از سطح ورق انتخاب شده و تغییرات سختی مناطق مختلف و فاصله 500 میکرومتر، با استفاده از دستگاه ریزسختی سنجی مدل Buehler Micromet 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 30×4 میلی‌متر از سطح مقطع جوش برش داده و مانت شدند. پس از سنباده‌زنی با پودر آلومینا با اندازه ذره 0/3 میکرومتر پولیش شدند. درنهایت فولاد زنگ‌نزن 316L و آلیاژ آلومینیوم

ابزار جوشکاری مورد استفاده 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 [16-18] 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 درون فولاد زنگ‌نزن 316L وارد شود.

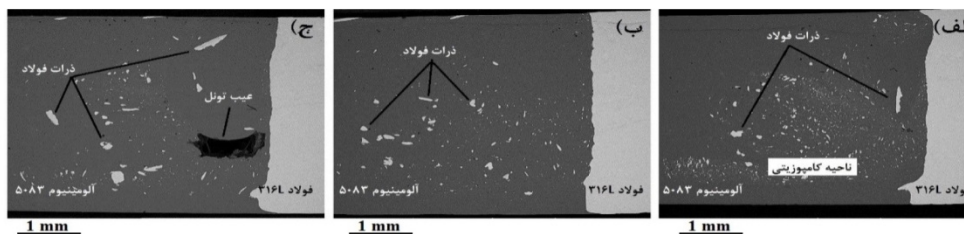


شکل 1- طرح‌واره‌ای از گیره مورد استفاده و هندسه اتصال.

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.

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

| ترکیب شیمیایی (درصد حجمی)        |        |                   | محلول حکاکی  |
|----------------------------------|--------|-------------------|--------------|
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | HCl    | CuCl <sub>2</sub> | محلول کالینگ |
| 100 cc                           | 100 cc | 5 g               |              |
| H <sub>2</sub> O                 | NaOH   | KMnO <sub>4</sub> | محلول وک     |
| 100 cc                           | 1 g    | 4 g               |              |



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

شکل 4- 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.

است که بین عمدتاً در قسمت پیش‌ران (سمت آلومینیوم) به گردش درآمده و به میزان کمی، در حد 0/05 mm 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 بر اثر حرکت چرخشی و انتقالی بین، 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 کاهش یافته، دوماً، حجم آن‌ها افزایش یافته 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 [10-13].

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.

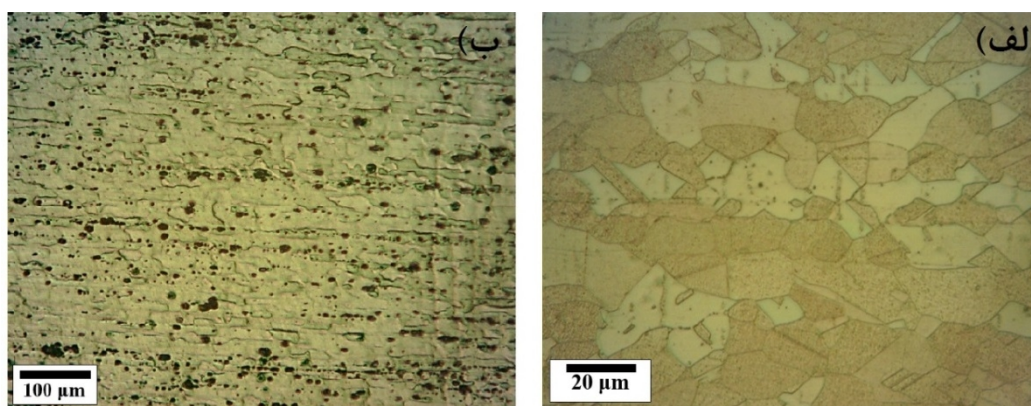
### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- ریزساختار

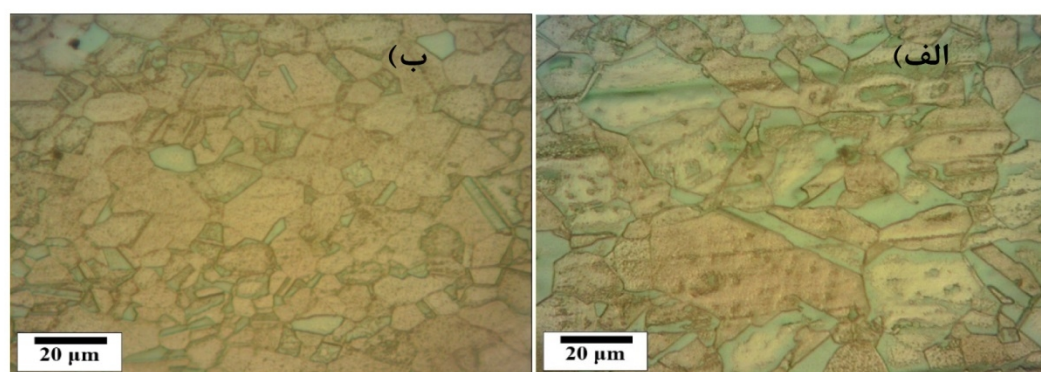
در شکل (4) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع جوش نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 16، 20 و 25 میلی‌متر بر دقیقه آورده شده است. با توجه به نتایج آنالیز طیف‌سنجی انرژی، فصل مشترک بین آلیاژ آلومینیوم 5083 (تیره‌رنگ) و فولاد 316L (به رنگ روشن)، تقریباً به‌صورت یک خط صاف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

این امر نشان می‌دهد که در فصل مشترک دو آلیاژ، رقت تنها در مقیاس میکروسکوپی صورت گرفته است. این امر به دلیل آن





شکل 5- تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار فلز پایه الف - فولاد زنگ‌نزن 316L و ب- آلیاژ آلومینیوم 5083.

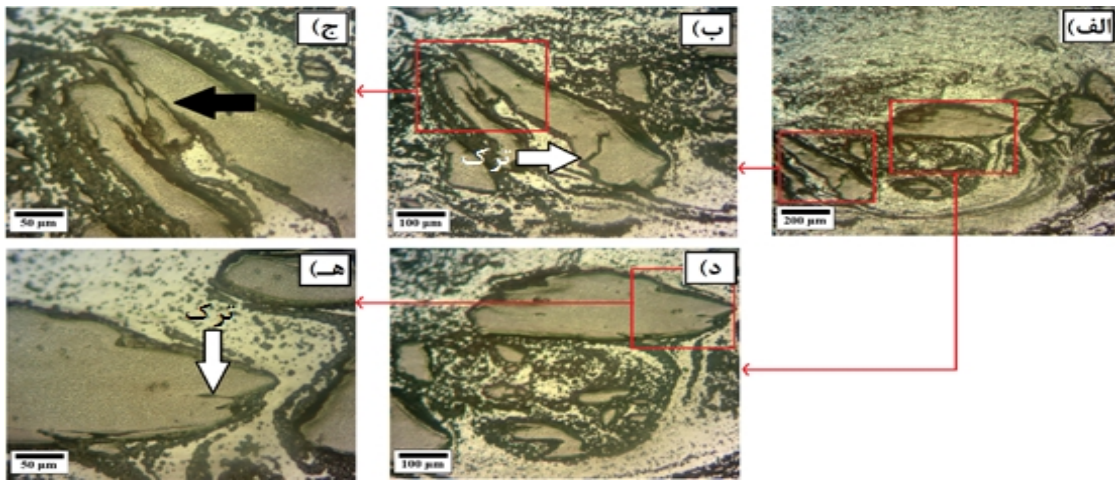


شکل 6- الف- تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن 316L و ب- ریزساختار نزدیک به منطقه اغتشاشی در فولاد زنگ‌نزن 316L.

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

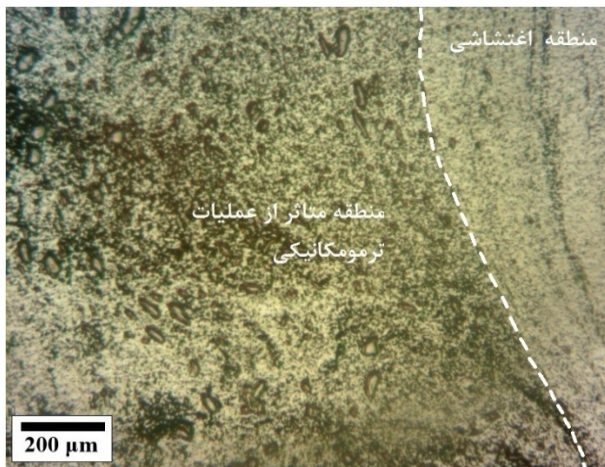
در شکل (7)، قسمتی از ریزساختار منطقه اغتشاشی (منطقه کامپوزیتی) نمونه با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 20 میلی‌متر بر دقیقه آورده شده است. همان‌طور که در شکل (7-الف) ملاحظه می‌شود ذرات فولادی در اندازه و اشکال مختلف در ساختار توزیع شده‌اند. از مشاهده

در شکل (5-الف و 5-ب)، به ترتیب ریزساختار فلز پایه 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 کرده است. در شکل (6-الف)، دانه‌ها به‌صورت هم‌محور است و تقریباً در تمام ریزساختار، زاویه مرز دانه حدود 120 درجه است. با بررسی شکل (6-الف) مشخص می‌شود که در برخی نقاط زاویه مرز دانه‌ها تغییر کرده و دانه‌ها شکل نامنظمی به خود گرفته‌اند.



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

دینامیکی شود. در پژوهشی توسط ما و همکاران [22] توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نشان داده شده است که در این ناحیه مرزهای فرعی تشکیل شده و چگالی بالایی از نابعی‌ها 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 میلی متر بر دقیقه.

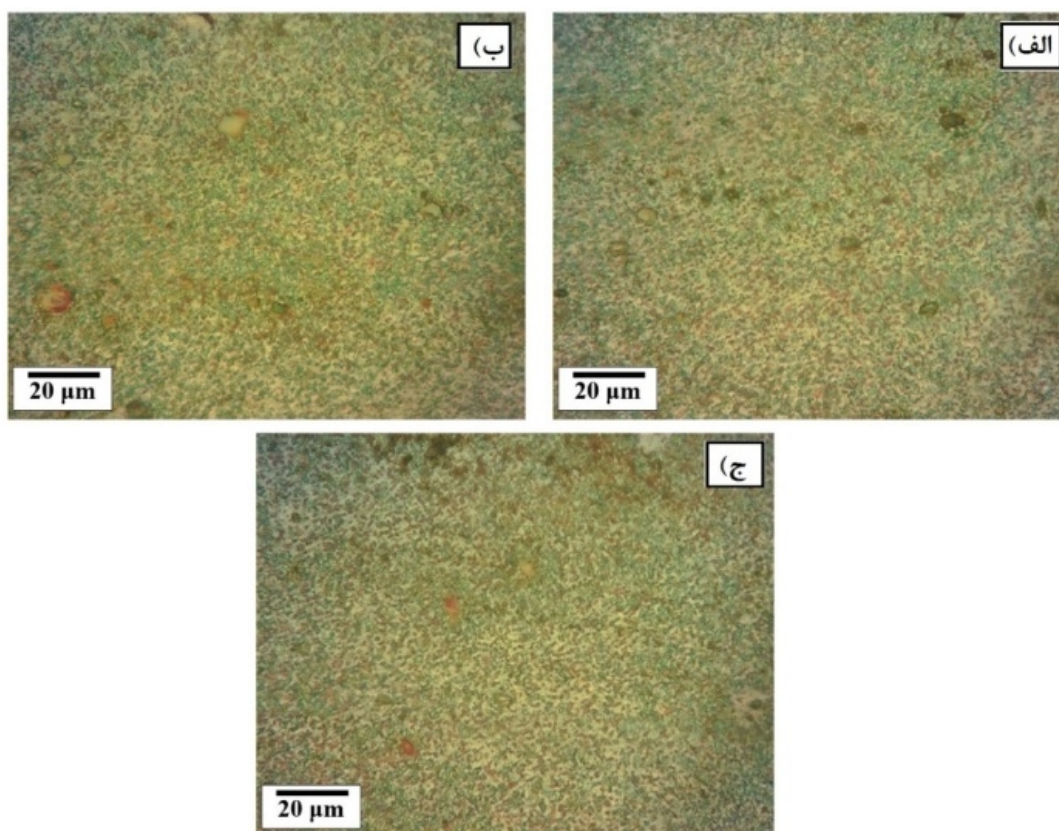
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ریزساختار این قسمت شامل دانه‌های هم‌محور است که در اثر تبلور مجدد دینامیکی به وجود آمده‌اند. با توجه به شکل (9-الف الی 9-ج) مشاهده می‌شود در این پژوهش، دانه‌بندی در منطقه اغتشاشی وابستگی چندانی به سرعت خطی نداشته و اندازه دانه‌ها در حدود 1 تا 10 میکرومتر است.

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 جدا شده‌اند 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، به احتمال زیاد به واسطه 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 مشخص شده‌اند). نکته سومی که از تمامی تصاویر دریافت می‌شود آن است که این ذرات در جهت سیلان زمینه آلومینیومی آرایش پیدا کرده‌اند. این امر به آن دلیل رخ می‌دهد که ذرات فولادی می‌بایست خود را به گونه‌ای 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 میلی متر بر دقیقه، نشان داده شده است. (مرز بین منطقه اغتشاشی و منطقه TMAZ توسط خط چین 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 به گونه‌ای نیست که بتواند منجر به تبلور مجدد





شکل 9- تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار منطقه اغتشاشی نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت چرخش

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 یک لایه نازک به عرض حدود 2 میکرومتر در فصل مشترک به وجود آمده است. همچنین مشاهدات نشان داد که هیچ گونه 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 فلز پایه فولاد زنگ‌نزن 316L و آلومینیوم 5083 کمتر است. به علاوه نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه با

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 نداده است و در نتیجه عیب تونل به وجود آمده است. با توجه به پژوهش ایلانگوان 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 داده شده 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 قرمز رنگ مشخص شده، نیز در شکل (11-ب) نشان داده شده است.

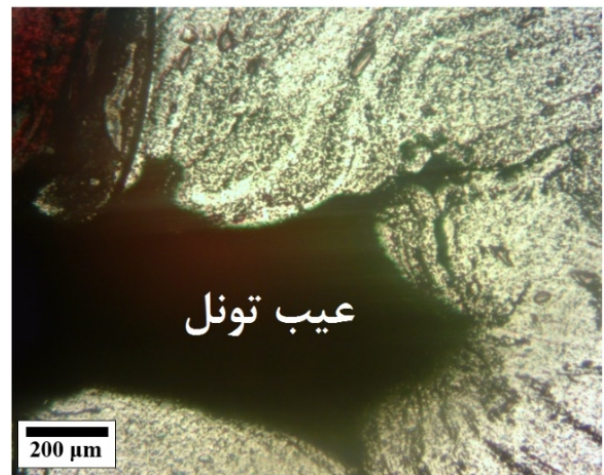


هرچند در نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی 20 میلی متر بر دقیقه، مشابه با نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی 16 میلی متر بر دقیقه، عیب تونل مشاهده نمی شود، ولی استحکام این جوش (110MPa) حدود یک سوم استحکام کششی جوشکاری شده با سرعت پیشروی 16 میلی متر بر دقیقه (298 MPa) است. این تفاوت شدید در استحکام را می توان به اندازه (حجم) ذرات تقویت کننده و نحوه توزیع آن ها نسبت داد. همچنین با توجه به کاهش ذرات و عدم وجود عیب تونل در این نمونه انعطاف پذیری بالاتر از نمونه با سرعت پیشروی 16 میلی متر بر دقیقه (26 درصد) است. مطالعات ژانگ و همکاران [25] و چن و همکاران [26] نشان می دهند که با یکنواخت تر شدن توزیع ذرات تقویت کننده (فولاد) استحکام مکانیکی بالاتری حاصل خواهد شد.



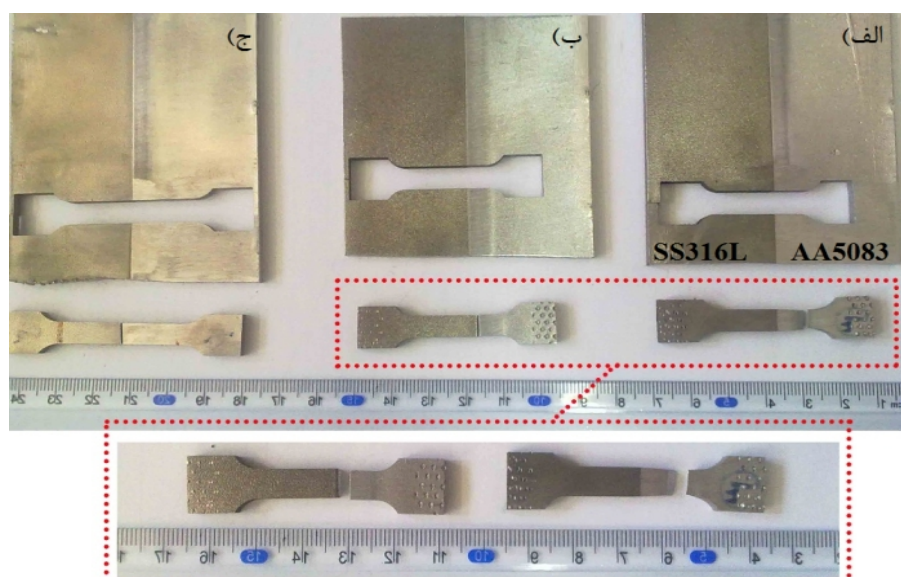
شکل 11- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی الف - منطقه اغتشاشی نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 25 میلی متر بر دقیقه و ب - منطقه مشخص شده با دایره قرمز در شکل الف با بزرگنمایی بیشتر.

استحکام کششی برابر با 298 MPa و انعطاف پذیری 26 درصد از منطقه HAZ سمت پیشران (آلیاژ آلومینیوم) و نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی 20 میلی متر بر دقیقه با استحکام کششی برابر با 110 MPa و انعطاف پذیری 32 درصد درست از نزدیکی فصل مشترک جوش و از سمت پیشران شکسته شده است. با این حال، نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی 25 میلی متر بر دقیقه با استحکام کششی برابر با 35 MPa و انعطاف پذیری 3 درصد از فصل مشترک دو آلیاژ گسیخته شده است.



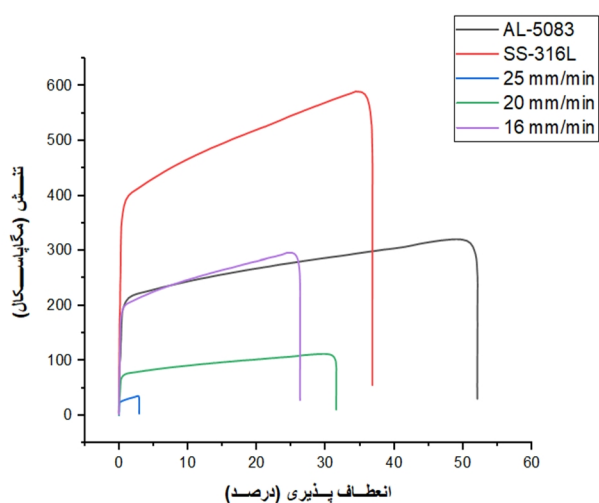
شکل 10- تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار قسمتی از ناحیه اغتشاشی نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخش 250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 25 میلی متر بر دقیقه (نشان دهنده عیب تونلی شدن).

در نمونه جوشکاری شده با سرعت پیشروی 25 میلی متر بر دقیقه، به دلیل وجود عیب تونل و در نتیجه کاهش سطح مقطع مؤثر اتصال، استحکام و انعطاف پذیری جوش به شدت افت کرده است. همان طور که در شکل (11) ملاحظه شد، تونل ایجاد شده، دارای گوشه های تیز است که این امر اثر، مضاعفی بر کاهش استحکام جوش خواهد داشت. با توجه به منابع این گوشه های تیز به عنوان نقاط تمرکز تنش مطرح هستند [24]. علاوه بر این همان طور که در شکل (4) مشاهده می شود، توزیع ذرات تقویت کننده فولاد در این نمونه نسبت به دیگر نمونه ها 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.



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.

فصل مشترک اتصال است. این مسئله به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی با سختی بالا در این منطقه است. به طور مشابه در تحقیق واتانابل و همکاران [18] این مسئله مشاهده شده است. در منطقه اغتشاشی (نواحی کامپوزیتی در شکل 4)، سختی به صورت تدریجی افزایش یافته است. این رویداد به دو دلیل رخ داده است.



شکل 13- نمودار تنش-کرنش فلزات پایه و نمونه‌های جوشکاری شده.

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

برای ارزیابی تغییرات سختی در مقطع اتصال از آزمون سختی سنجی 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 فلز پایه تا فصل مشترک اتصال بسیار ملایم است. در قسمت HAZ و TMAZ سمت پسران، سختی به آرامی افزایش یافته است. این افزایش در میزان سختی به دلیل کرنش سختی و ریز شدن دانه‌ها در این ناحیه از اتصال است. ریز شدن دانه‌ها در این منطقه در شکل (9)، به وضوح مشاهده می‌شود. 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 در نتیجه 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

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 شده است. دیمپل‌های بسیار ریز در شکل (15-الف)، نشان‌دهنده آن است که این نمونه از یک ناحیه ریزدانه و هم‌محور شکسته شده است. 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 نشان‌دهنده 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 در نهایت ساختار منطقه اغتشاشی حاصل به صورت ناپیوسته خواهد بود. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که در اثر افزایش سرعت پیشروی ابزار و در نتیجه کاهش حرارت ورودی فرایند، سیلان مواد به‌گونه مؤثری رخ نداده است که نتیجه این امر را می‌توان در ظاهر شکست آن مشاهده نمود

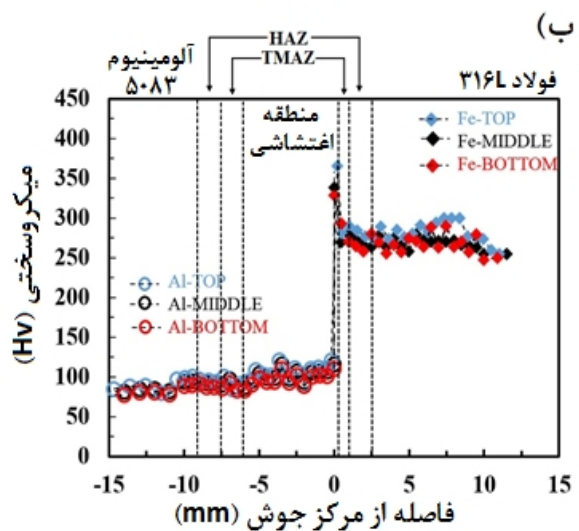
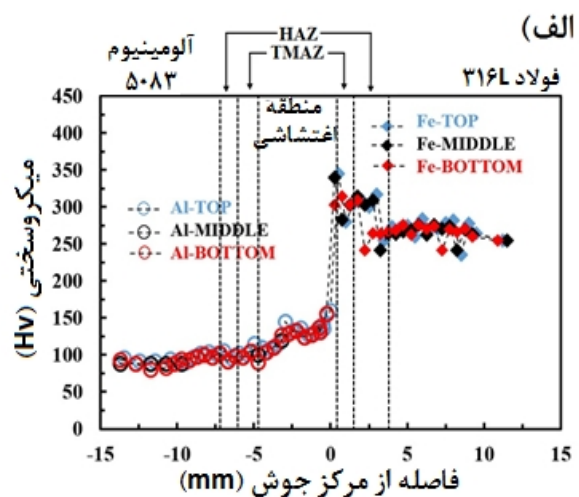
#### 4- نتیجه‌گیری

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

- منطقه اغتشاشی اتصال برخلاف منطقه اغتشاش جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی فلزات مشابه، به صورت 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

مقایسه شکل‌های (14-الف و 14-ب)، ملاحظه شد که با کاهش سرعت پیشروی ابزار از 20 به 16 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. از آنجاکه 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.



شکل 14- 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.



- سرعت پیشروی ابزار تأثیر قابل ملاحظه‌ای 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 پیشروی 16 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.

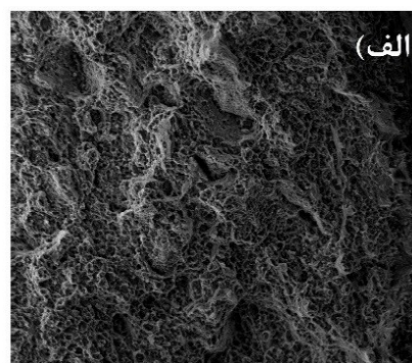
3-Liu, Xiaoru, et al. "Mechanical property comparisons between CrCoNi medium-entropy alloy and 316 stainless steels." *Journal of Materials Science & Technology* 108 (2022): 256-269.

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.

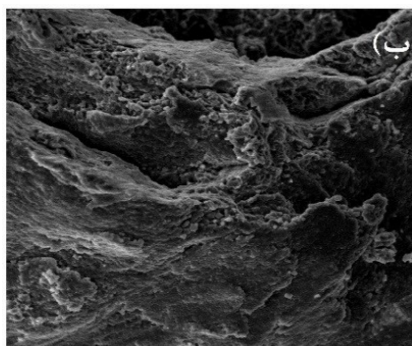
5-Jabraeili, Reza, et al. "Effect of FSW process parameters on microstructure and mechanical properties of the dissimilar AA2024 Al alloy and 304 stainless steel joints." *Materials Science and Engineering: A* 814 (2021): 140981.

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.

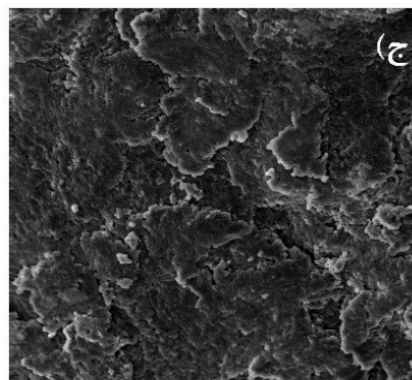
فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L و آلومینیوم 5083 دارد و با افزایش سرعت پیشروی ابزار از 16 به 25 میلی‌متر بر دقیقه، اندازه ذرات فولادی در منطقه اغتشاش، افزایش می‌یابد و توزیع آن‌ها ناهمگن‌تر می‌شود. با افزایش سرعت پیشروی از 16 به 20 میلی‌متر بر دقیقه پروفیل سختی در مقطع اتصال نشان‌دهنده نوسانات شدیدتری است.



50 μm



20 μm



20 μm

شکل 15- 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.



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 for 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 International 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 of 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