



## اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم سری 5xxx به 7xxx با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی

علی سال افزون<sup>1</sup>، امین ربیعی زاده<sup>2\*</sup>

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

2- استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

\* شیراز، صندوق پستی 7178774731، rabieezadeh@iaushiraz.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 مرداد 1399

داوری اولیه: 24 شهریور 1399

پذیرش: 29 آبان 1399

### کلیدواژگان:

اتصال غیرهمجنس

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

خودواکنشی

ابزار دوکی شکل شناور

خواص مکانیکی

راندمان اتصال

به منظور ارزیابی امکان اتصال همجنس و غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم 5019 و 7039، ورق‌هایی به ضخامت 3 میلی‌متر از این آلیاژها به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی جوشکاری شدند. ابزار دوکی شکل شناور مورد استفاده برای جوشکاری از جنس فولاد گرم کار عملیات حرارتی شده، طراحی و ساخته شد. اثر متغیرهای مختلف فرایند نظیر فاصله بین شانه‌ها، سرعت پیشروی و سرعت چرخش ابزار به منظور ایجاد اتصالی عاری از عیب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بازرسی چشمی و رادیوگرافی نشان داد که اتصال سالم در سرعت پیشروی 22 mm/min و سرعت چرخش ابزار 1120 rpm بدست می‌آید. نتایج آزمون کشش نشان داد که راندمان اتصال بدست آمده برای اتصال‌های 5019-5019، 7039-7039 و 5019-7039 به ترتیب 72، 76 و 91/5% است که از راندمان اتصال با روش‌های ذوبی بیشتر و قابل مقایسه یا بیشتر از راندمان اتصال با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی است. ارزیابی میکروسکوپی سطح شکست نمونه‌های جوشکاری شده نشان داد که برای اتصال‌های همجنس، مکانیزم شکست غالب، شکست نرم می‌باشد اما برای اتصال غیرهمجنس، مکانیزم غالب شکست ترد می‌باشد. ارزیابی سختی سطح مقطع عرضی قطعات جوشکاری شده در نزدیکی شانه بالایی و پایینی نشان داد که میزان سختی در نزدیکی شانه پایینی ابزار همواره بیشتر است. بیشتر بودن سختی در مجاورت شانه پایینی را می‌توان به دمای پایین‌تر قطعه در این ناحیه نسبت داد.

## Dissimilar welding of 5xxx and 7xxx aluminum alloy by self-reacting friction stir welding method

Ali Salafzon<sup>1</sup>, Amin Rabieezadeh<sup>2\*</sup>

Department of Materials Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

\* P.O.B. 7178774731 Shiraz, Iran, rabieezadeh@iaushiraz.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 15 August 2020  
First Decision: 15 September 2020  
Accepted: 20 November 2020

### Keywords:

Dissimilar welding  
Self-reacting friction stir welding  
Floating bobbin tool  
Mechanical properties  
Joint efficiency

### Abstract

In order to evaluate the possibility of the similar and dissimilar welding of 5019 and 7039 aluminum alloys, plates of 3 mm thick from this alloy were welded via Self-Reacting Friction Stir Welding (SRFSW) method. Floating bobbin tool was designed and manufactured from heat-treatable hot working steel to perform the welding process. The effect of various process variables such as the shoulders pinching gap, the tool transverse speed and the tool rotational speed were investigated to establish a defect-free joint. Following the visual inspection and X-ray radiography, it was found that a defect-free joint is obtained at the transverse speed of 22 mm/min and rotational speed of 1120 rpm. The results of tensile test, also, revealed that the joint efficiency of 5019-5019, 7039-7039 and 7039-5019 joints are 72, 76 and 91.5%, respectively. Accordingly, these amounts were more than the joint efficiency of the fusion welding, and comparable with/more than the joint efficiency of Conventional Friction Stir Welding (CFSW). Microscopic evaluation of the fracture surface of welded pieces indicated that the dominant fracture mechanism for similar joints is the soft fracture, while the one for non-similar fracture is the brittle fracture. Assessment of the cross-sectional hardness of the welded pieces near the upper and lower shoulders showed that the degree of hardness near the lower shoulder of the tool is always higher, which can be attributed to the lower temperature of the work piece in this area.

### 1- مقدمه

تکنیک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی<sup>2</sup> است. ویژگی‌های متعدد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی آن را نسبت به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی جذاب‌تر

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی<sup>1</sup> نوع خاصی از

<sup>2</sup> Conventional Friction Stir Welding (CFSW)

<sup>1</sup> Self-Reacting Friction Stir Welding (SRFSW)

### Please cite this article using:

A. Salafzon, A. Rabieezadeh, Dissimilar welding of 5xxx and 7xxx aluminum alloy by self-reacting friction stir welding method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 1- 13, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ناسا از این تکنولوژی برای جوشکاری مخازن سوخت خارجی ساتالهای فضایی استفاده می‌کند [8-15].

بدین منظور بررسی‌هایی در خصوص ارزیابی کیفیت اتصال همجنس و غیرهمجنس مواد و آلیاژهای مختلف توسط محققان صورت گرفته است که خلاصه‌ای از این تلاش‌ها در زمینه آلیاژهای آلومینیم سری 5XXX و سری 7XXX در جدول 2 قابل مشاهده است. در صنایع مختلف، به خصوص خودروسازی، از جایگزینی آلیاژهای معمول که عمدتاً فولادی هستند با آلیاژهای سبک، پر استحکام و مقاوم در برابر خوردگی به منظور کاهش وزن و به طور متقابل کاهش مصرف سوخت استقبال می‌شود. از دسته آلیاژهای با نسبت استحکام به وزن بالا و مقاوم در برابر خوردگی می‌توان به آلیاژهای منیزیم و آلومینیم اشاره کرد. این جایگزینی سبب می‌شود که در فرایند ساخت اتصال غیرهمجنس مواد و آلیاژها اجتناب ناپذیر باشد. بدین ترتیب اتصال غیرهمجنس به روش‌های مختلف ذوبی در صنایع مختلف نظیر خودرو، کشتی‌سازی، هوافضا، نظامی و ... گسترش یافت. اگرچه تکنیک‌های موفق مختلفی برای اتصال غیرهمجنس وجود دارد، اما این قبیل اتصال‌ها به دلیل تفاوت در ترکیب شیمیایی، تفاوت در ضریب انبساط حرارتی، اختلاف دمای ذوب، تشکیل فازهای بین فلزی ترد، تشکیل عیوب، افت خواص مکانیکی و ... همواره دچار چالش است. بر این اساس، بسیاری از شرکت‌ها برای غلبه بر این چالش‌ها و ایجاد اتصالاتی عاری از عیب، با خواص مکانیکی مطلوب به سمت استفاده از روش‌های جوشکاری حالت جامد تمایل پیدا کردند [16-24].

کرده است. در مقایسه با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی، ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی شامل یک شانه اضافه تحت عنوان شانه پایین است که در انتهای پین ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی قرار می‌گیرد [1-7]. تغییر طراحی ابزار از CFSW به SRFSW با اضافه کردن شانه پایینی سبب تفاوت‌های بسیاری در فرایند شده است که به برخی از آن‌ها در جدول 1 اشاره شده است. در حال حاضر، جوشکاری خطی مانند اتصال پروفیل‌های خطی یا قطعات همجنس از معمول‌ترین کاربردهای جوشکاری اصطکاکی است. از این روش در ژاپن بطور گسترده‌ای در صنایع وسایل نقلیه ریلی استفاده می‌شود، در عین حال در سایر کشورها این روش به طور عمده در صنایع کشتی‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کف قطارهای سریع ژاپنی با عنوان شینکانسن از 4 ورق آلیاژ آلومینیم رسوب سخت شونده ساخته می‌شود که به طور همزمان توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به یکدیگر متصل می‌شوند. علاوه بر این، از این روش در ساخت سازه‌هایی از جنس آلیاژهای آلومینیم نظیر عرشه پل‌ها، مبدل‌های حرارتی، بدنه هواپیما و آنتن‌های سهموی نیز استفاده می‌شود. روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی با توجه به کاربردهای آن در صنعت و همچنین میزان اقبال و توجه محققین به آن، در ابتدای توسعه و پیشرفت خود قرار دارد. بزرگترین مزیت روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خود واکنشی در اتصال پروفیل‌های بلند بوده و جایگزین روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی شده است. در این بین،

#### جدول 1 مقایسه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی

Table 1 Comparison of conventional friction stir welding and self-reacting friction stir welding

| جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی  | جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی   |
|---|---|
| - به منظور تحمل نیروی عمودی اعمال شده توسط ابزار، به صفحه پشت‌بند نیاز است.   | - شانه دوم به عنوان پشتیبان عمل کرده و نیازی به صفحه پشت‌بند نمی‌باشد.  |
| - چیدمان یک شانه‌ای ابزار حرارت کمتری در حین فرایند تولید می‌کند.   | - چیدمان دو شانه‌ای ابزار حرارت کافی در هر دو سمت قطعه کار ایجاد می‌کند.  |
| - بخش عمده حرارت ایجاد شده در حین فرایند از طریق صفحه پشت‌بند منتقل می‌شود.   | - تمامی حرارت ایجاد شده در حین فرایند بدون هیچ اتلافی صرف گرم شدن قطعه کار می‌شود.  |
| - سطح مقطع گرده جوش به شکل جام است و توزیع اندازه دانه در این ناحیه به دلیل اثر سردکنندگی صفحه پشت‌بند، یکنوانت نمی‌باشد. | - سطح مقطع گرده جوش به شکل ساعت شنی است و تغییر محسوسی در اندازه دانه در این ناحیه در امتداد ضخامت قطعه کار مشاهده نمی‌شود. |
| - نیروی عمودی زیادی در حین اجرای فرایند توسط ابزار به قطعه کار وارد می‌شود.   | - نیروی عمودی‌ای که در حین فرایند توسط ابزار به قطعه کار وارد می‌شود ناچیز و در حد صفر است.                                 |
| - عدم نفوذ کامل از مهمترین عیوب این روش است.  | - اتصالاتی با نفوذ کامل از ویژگی‌های این روش است.   |
| - برای جوشکاری مقاطع ضخیم، باید جوشکاری چند پاسه انجام داد.   | - این روش در جوشکاری مقاطع ضخیم از کارایی بالایی برخوردار بوده و این مقاطع را به صورت تک پاسه جوش می‌دهد.                   |

جدول 2 خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در زمینه اتصال همجنس و غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم سری 5xxx و 7xxx

Table 2 Summary of the research regarding similar and dissimilar AA5xxx and AA7xxx welding

| ماده   | اتصال  | توضیحات  | سال  | مرجع |
|--|--|--|------|------|
| AA5083-H111<br>AA5182-H111                       | FSW-Similar  | بررسی اثر پارامترهای مختلف جوشکاری بر ریزساختار و خواص مکانیکی                                       | 2011 | [25] |
| AA5083-T4  | FSW-Similar<br>TIG-Similar                                 | مقایسه خواص اتصال ایجاد شده به روش‌های FSW و TIG   | 2017 | [26] |
| AA5083   | FSW-Similar  | بررسی سرعت چرخش ابزار بر خواص مکانیکی اتصال  | 2018 | [27] |
| AA7039   | FSW-Similar<br>TIG-Similar<br>MIG-Similar                  | مقایسه تاثیر روش جوشکاری بر خواص مکانیکی ناحیه اتصال   | 2008 | [28] |
| AA7039   | FSW-Similar  | ارزیابی تاثیر ابعاد و هندسه شانه بر اتصال  | 2014 | [29] |
| AA7XXX   | FSW-Similar<br>TIG-Similar<br>MIG-Similar<br>Laser-Similar | مرورری بر تاثیر روش‌های مختلف جوشکاری بر خواص ناحیه اتصال  | 2017 | [30] |
| AA7039   | FSW-Similar  | بهبود استحکام/ نرمی ناحیه اتصال  | 2019 | [31] |
| AA5083-H116<br>AA7075-T6                         | FSW-Dissimilar   | بررسی افزودن ذرات Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> بر ریزساختار، مقاومت به خوردگی و چقرمگی ناحیه اتصال | 2015 | [32] |
| AA5083-H111<br>AA7075-T651                       | FSW-Dissimilar   | ارزیابی ناحیه اتصال غیرهمجنس با استفاده از روش‌های EBSD و اشعه ایکس                                  | 2016 | [33] |
| AA5083-H22<br>AA7B04-O<br>AA7B04-AA<br>AA7B04-NA | FSW-Dissimilar   | بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه اتصال غیرهمجنس  | 2016 | [34] |
| AA5083-H111<br>AA7075-T6                         | FSW-Similar<br>FSW-Dissimilar                              | بررسی تاثیر سرعت پیشروی بر ریزساختار و بافت بلوری ناحیه اتصال  | 2017 | [35] |
| AA7075-T651<br>AA5083-H111                       | FSW-Dissimilar   | ارزیابی تاثیر متغیرهای فرایند بر خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس   | 2018 | [36] |
| AA5086-O<br>AA7039-T6                            | FSW-Dissimilar   | ارزیابی ریزساختار ناحیه اتصال غیرهمجنس   | 2019 | [37] |
| AA5454<br>AA7075                                 | FSW-Dissimilar   | ارزیابی تاثیر متغیرهای فرایند بر خواص متالورژیکی و مکانیکی اتصال غیرهمجنس                            | 2019 | [38] |

جوشکاری سر به سر قطعاتی به ابعاد 200mm×200mm حاصل شود. ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خود واکنشی، که قابلیت جوشکاری دوطرفه به صورت همزمان را دارد، ابزاری با دو شانه و یک پین طراحی و ساخته شد. ابزار دوکی شکل شناور به گونه‌ای طراحی شده که با حرکت آزادانه خود در راستای عمود بر سطح قطعه، مکانی با کمترین مقاومت در حین جوشکاری را با متعادل کردن نیروهای وارد شده بر هر یک از شانه‌ها پیدا می‌کند. از این رو به این ابزار، ابزار دوکی شکل شناور<sup>1</sup> گفته می‌شود. تصویر شماتیک این ابزار به همراه فیکسچر طراحی شده برای آن در شکل 1 نشان داده شده است. ابزار از جنس فولاد گرم کار H13 (1.2344) ساخته شده است که پس از عملیات حرارتی، سختی آن به 52 Rc رسیده است. برای ساخت فیکسچری صلب که بتواند ورق‌ها را در حین جوشکاری بدون حرکت نگه دارد، از فولاد میکروآلیاژی MO40 (1.7225) استفاده شد. قطر پین، شانه بالا و شانه پایین به ترتیب 6 mm، 22 و 22 انتخاب شد.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی راه حلی مقرون به صرفه برای اتصال غیرهمجنس میان آلیاژهایی با استحکام بالا، شکل پذیری و جوش پذیری خوب است. از طرفی مزایای تکنیک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی در مقایسه با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی بر کسی پوشیده نیست. از این رو در این پژوهش تلاش‌هایی در خصوص ارزیابی کیفیت اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم سری 5xxx و 7xxx به صورت دو طرفه با استفاده از تکنیک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خود واکنشی به عمل آمده است.

## 2- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ورق‌های نورد شده از آلیاژهای آلومینیم غیرهمجنس AA5019-H22 و AA7039-T61 با ضخامت 3 به عنوان فلز پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژها در جدول 3 نشان داده شده است. این ورق‌ها به صورت همجنس و غیرهمجنس (AA5019/AA5019، AA5019/AA7039 و AA7039/AA7039) با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی جوشکاری شدند.

ابعاد فلز پایه 100mm×200mm انتخاب شد تا پس از

<sup>1</sup> Floating Bobbin Tool

## جدول 3 ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده در این پژوهش

Table 3 Chemical composition of alloys used in this study

| آلیاژ      | عناصر آلیاژی |       |       |       |       |       |       |       |      |
|------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|            | Mg           | Zn    | Cu    | Mn    | Cr    | Ni    | Fe    | Si    | Al   |
| AA5019-H22 | 4/92         | 0/027 | 0/026 | 0/327 | 0/010 | 0/027 | 0/232 | 0/113 | Bal. |
| AA7039-T61 | 2/37         | 4/13  | 0/616 | 0/611 | 0/018 | 0/078 | 1/3   | 0/809 | Bal. |

ساعت تنظیم شد. برای بدست آوردن اتصال موفق در جوشکاری همجنس و غیرهمجنس پارامترهای جوشکاری تغییر داده شد که این پارامترها در جدول 4 ذکر شده است. لازم به ذکر است که انتخاب پارامترهای جوشکاری، بر اساس مطالعه نتایج سایر پژوهشگران، خواص مکانیکی فلز پایه، تجربه به دست آمده از کارهای قبلی و شرایط قطعه پس از جوشکاری می باشد و برای نمونه های بعدی بر اساس نتیجه بدست آمده تغییراتی در پارامترها داده شد.

پس از جوشکاری، برای اطمینان از سلامت قطعات جوشکاری شده و عاری از عیب بودن آنها، آزمون های غیرمخرب بازرسی چشمی و پرتونگاری با استفاده از اشعه ایکس بر روی نمونه ها انجام شد. به منظور بررسی های ریزساختاری آماده سازی نمونه ها با استفاده از سمباده های 400 تا 2000 انجام شد. حکاکی نمونه ها توسط محلول وک<sup>1</sup> با ترکیب 100ml آب، 4g KMnO<sub>4</sub> و 1g NaOH به مدت 20 ثانیه در دمای اتاق انجام شد [37]. پس از آماده سازی، نمونه ها به منظور بررسی ریزساختاری، با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد تصویربرداری قرار گرفتند.

خواص مکانیکی نمونه ها از طریق آزمون های کشش عرضی و ریزسختی ارزیابی شد. آزمون استحکام کششی عرضی با استفاده از دستگاه کشش universal مطابق با استاندارد ASTM E8-M انجام شد. سرعت فک دستگاه در این آزمون 2 mm/min انتخاب گردید. برای تعیین استحکام خمشی نمونه ها، آزمون خمش سه نقطه ای بر اساس استاندارد ASME Sec. IX با استفاده از دستگاه یونیورسال 2 تن بر روی نمونه ها انجام شد. سختی نمونه ها از طریق آزمون ریزسختی ویکرز و با استفاده از دستگاه سختی سنج مدل DHV-1000 تعیین گردید. در این آزمون از نمونه های تهیه شده در مرحله متالوگرافی که دارای صافی سطح مناسبی بودند استفاده شده است. به منظور تعیین پروفیل سختی ناحیه اتصال، ریزسختی سنجی بر روی مقطع عرضی انجام شد. برای این کار، میزان نیروی و مدت زمان اعمال نیرو توسط دستگاه به ترتیب 1 کیلوگرم و 15 ثانیه انتخاب شد.

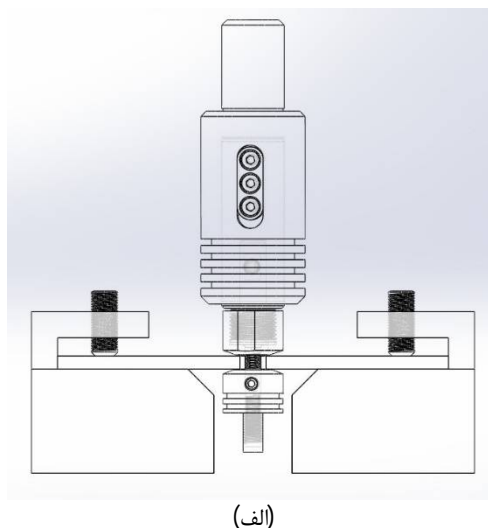


Fig. 1 The image of the floating bobbin tool and its fixture; a. schematic image and b. the real picture

شکل 1 تصویر ابزار دوکی شکل شناور و فیکسچر آن؛ الف) تصویر شماتیک و ب) تصویر واقعی

پروفیل پین استوانه ای رزوه دار انتخاب شد. ابزار در راستای عمود بر ورق فرایند جوشکاری را انجام داد و هیچ زاویه انحرافی نداشت. فرایند جوشکاری با استفاده از دستگاه فرز عمودی (مدل M3) انجام شد. در اتصال های غیرهمجنس، آلیاژ AA5019-H22 در سمت پسر و آلیاژ AA7039-T61 در سمت پیشرو قرار داده شد. همچنین جهت چرخش ابزار در جهت چرخش عقربه های

<sup>1</sup> Weck's Reagent

جدول 4 پارامترهای جوشکاری اعمال شده در این پژوهش

Table 4 Welding parameters implemented in this study

| شماره نمونه | فلز پایه      | فاصله بین شانه‌ها (mm) | سرعت پیشروی ابزار (mm/min) | سرعت چرخش ابزار (rpm) | توضیحات  |
|-------------|---------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|--|
| 1           | AA5019-AA5019 | 2/9                    | 30                         | 800                   | عدم اتصال به دلیل عدم سیلان کافی مواد                      |
| 2           | AA5019-AA5019 | 2/9                    | 30                         | 1120                  | عدم اتصال ناحیه زیرین ورق به دلیل حرارت ناکافی در آن ناحیه |
| 3           | AA5019-AA5019 | 2/9                    | 22                         | 1120                  | عدم نفوذ کامل به دلیل نیروی عمودی ناکافی                   |
| 4           | AA5019-AA5019 | 2/7                    | 22                         | 1120                  | اتصال مطلوب عاری از عیوب ظاهری                             |
| 5           | AA7039-AA7039 | 2/7                    | 22                         | 1120                  | اتصال مطلوب عاری از عیوب ظاهری                             |
| 6           | AA7039-AA5019 | 2/7                    | 22                         | 1120                  | پارگی ورق در آغاز جوشکاری به دلیل نیروی عمودی بیش از حد    |
| 7           | AA7039-AA5019 | 2/9                    | 22                         | 1120                  | اتصال مطلوب عاری از عیوب ظاهری                             |

### 3- نتایج و بحث

ساده‌ترین و الزامی‌ترین روش ارزیابی نمونه‌های جوشکاری شده، بازرسی چشمی است که از طریق آن می‌توان به بسیاری از عیوب ظاهری نمونه‌ها پی برد. لذا قبل از نمونه برداری جهت آزمون‌های مکانیکی، نمونه‌های جوشکاری شده مورد بازرسی چشمی قرار گرفتند. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خود واکنشی، بدلیل وجود دو شانه در دو طرف قطعه کار، هر دو سطح کار ظاهری شبیه به قطعه جوشکاری شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک طرفه دارد. با توجه به تغییر پارامترهای جوشکاری جهت بدست آوردن اتصالی مطلوب و عاری از عیب با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی، موفقیت ظاهری فرایند با استفاده از بازرسی چشمی قابل تشخیص می‌باشد. در شکل 2 تصاویر برخی از نمونه‌ها بعد از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی مشاهده می‌شود.

در شکل‌های 2- الف و ب تصاویر رو و پشت اتصال همجنس ناموفق AA5019 قابل مشاهده است (نمونه 1). سرعت بالای پیشروی ابزار به همراه سرعت چرخش کم ابزار از عوامل اصلی عدم موفقیت این اتصال است. با تغییر منطقی پارامترهای جوشکاری بعد از چند سعی و خطا، اتصال همجنس AA5019 موفقیت ایجاد شد (شکل‌های 2- ج و د نمونه 4). در پژوهش حاضر با تغییر سه متغیر سرعت چرخش ابزار، سرعت پیشروی ابزار و فاصله بین شانه‌ها، اتصال قابل قبولی ایجاد شد. فاصله بین شانه‌ها در روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوکی شکل، معادل نیروی آهنگری در روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمول است. از این رو با افزایش فاصله بین شانه‌ها (یعنی کاهش نیروی آهنگری)، امکان تشکیل عیب عدم

پارگی و یا حفره تونلی وجود دارد. در نمونه شماره 1، حرارت اصطکاکی تولید شده در نتیجه انتخاب اولیه پارامترها برای جوشکاری مناسب نبوده و لذا عملاً اتصالی صورت نپذیرفته است. در نمونه شماره 2 برای جبران این اتفاق، سرعت چرخش ابزار افزایش داده شد تا حرارت اصطکاکی بیشتر شود و اتصال مطلوب تری برقرار گردد. که پس از بررسی ظاهر نمونه شماره 2 و عدم اتصال ناحیه زیرین جوش، مشخص گردید که همچنان حرارت اصطکاکی برای سیلان مطلوب قطعات و ایجاد اتصال مطلوب کافی نیست. برای افزایش حرارت اصطکاکی، سرعت پیشروی ابزار کاهش داده شد و باز هم عدم اتصال در ناحیه زیرین جوش مشاهده گردید که یکی از دلایل آن ناکافی بودن نیروی عمودی است. از این رو در نمونه شماره 4، با کاهش فاصله میان شانه‌ها، نیروی عمودی کافی برای اتصال تامین شده و اتصالی عاری از عیب ایجاد گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو سطح قطعه هیچگونه آثاری از عدم یکنواختی و عدم پیوستگی مشاهده نمی‌شود. همین شرایط برای اتصال همجنس AA7039 و اتصال غیرهمجنس AA7039-AA5019 مشاهده می‌گردد (نمونه‌های 5 و 7). نمونه 5 که اتصال همجنس آلیاژ 7039 می‌باشد نیز با پارامترهای نمونه 4 به خوبی جوشکاری شد. نمونه 5 که اتصال همجنس آلیاژ 7039 می‌باشد نیز با پارامترهای نمونه 4 به خوبی جوشکاری شد. اما انتخاب همان پارامترها برای اتصال غیرهمجنس مناسب نبوده و سبب پارگی ورق به دلیل حرارت ورودی بیش از حد گردید. از این رو در نمونه شماره 7 برای کاهش حرارت ورودی، فاصله بین شانه‌ها بیشتر شد و اتصالی مطلوب ایجاد شد.

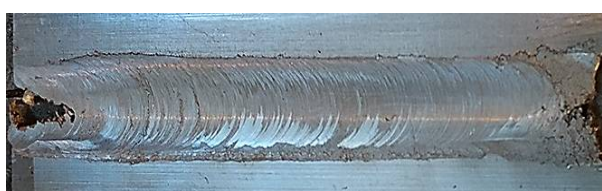
با موفقیت ظاهری اتصال به منظور اطمینان از عدم تشکیل عیوب داخلی در حین فرایند و عاری از عیب بودن فرایند



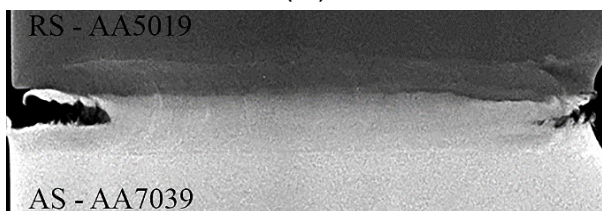
(ح)

**Fig. 2** Macrograph of welded samples; failed weld of AA5019-AA5019 (No. 1): a. face of the work-piece, b. back of the work-piece; Successful weld of AA5019-AA5019 (No. 4): c. face, d. back; AA-7039-AA7039 (No. 5): e. face, f. back; AA7039-AA5019 (No. 7): g. face, and h. back

شکل 2 تصاویر نمونه‌های جوشکاری شده؛ اتصال ناموفق AA5019-AA5019 (نمونه 1): الف) روی قطعه، ب) پشت قطعه؛ اتصال موفق AA5019-AA5019 (نمونه 4): ج) روی قطعه، د) پشت قطعه؛ AA7039-AA7039 (نمونه 5): ه) روی قطعه، و) پشت قطعه، AA7039-AA5019 (نمونه 7): ز) روی قطعه و ح) پشت قطعه



(الف)



(ب)

**Fig. 3** AA7039-AA5019 joint (No. 7): a. macrograph of sample, and b. digital radiographic image

شکل 3 اتصال AA7039-AA5019 (نمونه 7): الف) تصویر قطعه و ب) تصویر رادیوگراف دیجیتال

جوشکاری، آزمون غیرمخرب رادیوگرافی انجام شد (شکل 3). در رادیوگراف، هرچه میزان تشعشع عبوری از قطعه کمتر باشد، تصویر بدست آمده روشن‌تر خواهد بود. بدین ترتیب AA7039 که دارای عنصر آلیاژی سنگین Zn در مقایسه با Mg در AA5019 است، دارای میانگین عدد اتمی بالاتری است. لذا میزان تشعشع عبوری از AA7039 در مقایسه با AA5019 کمتر بوده و لذا در رادیوگراف روشن‌تر دیده می‌شود. از طرفی، در رادیوگراف بجز در ناحیه ابتدا و انتهای جوش هیچگونه عیبی مشاهده نمی‌شود. اختلاط دو آلیاژ در ناحیه میانی اتصال بخوبی صورت گرفته و اثری از عدم نفوذ، حفره تونلی، ترک و ... دیده نمی‌شود.



(الف)



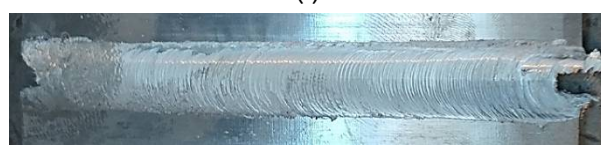
(ب)



(ج)



(د)



(ه)



(و)



(ز)

به منظور ارزیابی استحکام کششی نمونه‌های اتصال یافته با روش ابزار دوکی شکل شناور، آزمون کشش بر روی فلزات پایه و نمونه‌های جوشکاری شده انجام شد که نمودار تنش- کرنش، محل شکست نمونه‌ها و نتایج آزمون به ترتیب در شکل 4 و جدول 5 قابل مشاهده است.

آلیاژ AA7039-T61 از سری آلیاژهای آلومینیم عملیات حرارتی پذیر می‌باشد که استحکام کششی بالای آن (در حدود 403 MPa) در نتیجه عناصر آلیاژی، کارسختی و رسوب‌های  $MgZn_2$  تشکیل شده در آن پس از عملیات پیرسختی است. اما آلیاژ AA5019-H22 از سری آلیاژهای کارسخت شونده است که استحکام بالای خود را (در حدود 313 MPa) از عناصر آلیاژی و کارسختی بدست آورده است. اتصال این دو آلیاژ به صورت همجنس و غیرهمجنس نتایج خوبی از لحاظ استحکام کششی و کرنش شکست بر جای گذاشت (جدول 5).

جدول 5 خواص مکانیکی فلزات پایه و قطعات جوشکاری شده

Table 5 Mechanical properties of base metals and welded samples

| راندمان اتصال (%) | محل شکست            | کرنش شکست (%) | استحکام کششی (MPa) | فلز پایه                    |
|-------------------|---------------------|---------------|--------------------|-----------------------------|
| -                 | -                   | 23/6          | 312/94             | فلز پایه AA5019             |
| 72/8              | فلز پایه، سمت پیشرو | 18/7          | 228                | جوش AA5019-AA5019 (نمونه 4) |
| -                 | -                   | 16/6          | 403/38             | فلز پایه AA7039             |
| 76                | فلز پایه، سمت پسرو  | 10/64         | 306/76             | جوش AA7039-AA7039 (نمونه 5) |
| 91/5              | ناحیه اغتشاشی       | 13/9          | 286/44             | جوش AA7039-AA5019 (نمونه 7) |

اتصال غیرهمجنس، 91% است که بسیار قابل توجه می‌باشد. علاوه بر این محل شکست برای اتصال‌های همجنس در فلز پایه و برای اتصال غیرهمجنس در فلز جوش است. این بدین معناست که در اتصال‌های همجنس، ناحیه اغتشاشی از استحکام کششی و نرمی بالایی برخوردار است.

نکته قابل توجه این است که در آلایزهای رسوب سخت شونده نظیر آلایزهای سری 7xxx، در ناحیه متأثر از حرارت به دلیل حل شدن رسوبات، رشد دانه و آنیل شدن ساختار افت استحکام زیادی انتظار می‌رود. اما در خصوص AA7039 جوشکاری شده در این پژوهش محل شکست کاملاً درون فلز پایه است (شکل 4-ب). از طرفی، نمونه آزمون کشش اتصال غیرهمجنس، از میانه ناحیه اغتشاشی دچار شکست شده است که ارزیابی میکروسکوپی سطح مقطع شکست می‌تواند مکانیزم شکست را آشکار نماید.

به منظور ارزیابی کیفیت اتصال‌های همجنس و غیرهمجنس ایجاد شده، خواص مکانیکی آنها با پژوهش‌های پیشین مقایسه می‌شود. خلاصه‌ای از پژوهش‌های مشابه پیشین در جدول 6 ارائه شده است. لازم به ذکر است که در خصوص اتصال همجنس و غیرهمجنس AA5019، به روش‌های ذوبی یا غیرذوبی پژوهش مدونی تا کنون انجام نشده است. از این رو با توجه به مشابهت رفتار آلایزهای سری 5xxx با یکدیگر، نتایج پژوهش‌های انجام شده در زمینه اتصال همجنس و غیرهمجنس آلایز 5083 در جدول 6 جهت مقایسه ارائه گردیده است. همچنین در خصوص اتصال غیرهمجنس AA7039-AA5019 نیز بدلیل اینکه نتایج مدونی و مستندی وجود ندارد از پژوهش‌های به عمل آمده در زمینه اتصال غیرهمجنس AA7075-AA5083 جهت مقایسه و نتیجه‌گیری استفاده شده است.

آلایزهای آلومینیم با استحکام بالا، جوش‌پذیری پایینی در حین جوشکاری ذوبی از خود نشان می‌دهند.

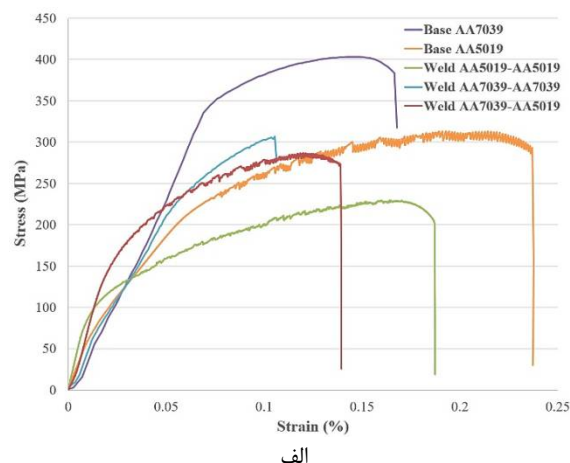


Fig. 4 Stress-strain curve of similar and dissimilar weld of AA5019 and AA7039, b. micrograph of samples

شکل 4 الف. نمودار تنش- کرنش اتصال همجنس و غیرهمجنس AA5019 و AA7039 و ب. تصویر نمونه‌ها

برای اتصال غیرهمجنس AA7039-AA5019 (نمونه 7)، استحکام کششی و کرنش شکست به ترتیب 286/44 MPa و 13/9% بدست آمد. برای اتصال‌های غیرهمجنس، راندمان اتصال به صورت تقسیم استحکام کششی قطعه جوشکاری شده بر استحکام کششی فلز پایه‌ای که استحکام کششی کمتری دارد، محاسبه می‌گردد [38، 39]. راندمان اتصال محاسبه شده برای

جدول 6 خلاصه خواص مکانیکی پژوهش‌های پیشین در زمینه اتصال همجنس و غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم 5xxx و 7xxx

Table 6 Summary of mechanical properties of previous studies on similar and dissimilar welding of 5xxx and 7xxx Al alloys

| مرجع | راندمان اتصال (%) | کرنش شکست جوش (%) | استحکام کششی جوش (MPa) | استحکام کششی فلز پایه (MPa) | روش جوشکاری | فلز پایه      |
|------|-------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------|-------------|---------------|
| [40] | 85                | 21                | 354                    | 414                         | FSW         | AA7039-AA7039 |
|      | 49                | 9/5               | 202                    | 414                         | TIG         |               |
|      | 53/26             | 8/2               | 204                    | 383                         | MIG         |               |
| [28] | 58/22             | 9/9               | 223                    | 383                         | TIG         | AA7039-AA7039 |
|      | 80/93             | 13/8              | 310                    | 383                         | FSW         |               |
| [41] | 82/8              | -                 | 317                    | 383                         | FSW         | AA7039-AA7039 |
| [42] | 85/6              | 21/4              | 354/4                  | 414                         | FSW         | AA7039-AA7039 |
| [29] | 83/5              | 7                 | 290/1                  | 347                         | FSW         | AA7039-AA7039 |
| [36] | 107               | 9/9               | 371                    | 604-346                     | FSW         | AA7075-AA5083 |
| [35] | 88                | 3                 | 274                    | 577-309                     | FSW         | AA7075-AA5083 |
| [38] | 88/5              | 9/8               | 230                    | 402-260                     | FSW         | AA7075-AA5454 |
| [43] | 86/5              | -                 | 277                    | 320                         | FSW         | AA5083-AA5083 |
|      | 72                | -                 | 231                    | 320                         | TIG         |               |
|      | 71/5              | -                 | 229                    | 320                         | FSW         |               |
| [26] | 22                | -                 | 70                     | 320                         | TIG         | AA5083-AA5083 |
| [27] | 73/8              | 12/4              | 203                    | 275                         | FSW         | AA5083-AA5083 |
| [44] | 84                | -                 | 313                    | 371                         | FSW         | AA5083-AA5083 |

3- در این پژوهش با استفاده از روش نوظهور جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی با سابقه پژوهشی اندک، راندمان اتصال همجنس برای AA5019 و AA7039 به ترتیب 72/8% و 76% بدست آمده است. که بسیار بیشتر از راندمان اتصال به روش جوشکاری ذوبی و قابل مقایسه با نتایج بدست آمده از اتصال به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی است.

4- راندمان اتصال غیرهمجنس AA5019-AA7039 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی 91/5% بدست آمد که منحصر بفرد بوده و در اغلب موارد بیش از راندمان اتصال بدست آمده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی است.

5- کرنش شکست اتصال همجنس و غیرهمجنس ایجاد شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی در اکثر موارد از کرنش شکست اتصال ایجاد شده به روش‌های ذوبی و روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی بیشتر است.

در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیم، در ناحیه اغتشاشی ترکیبی از تنش و دمای بالا (در حدود 450°C) به فلز پایه اعمال می‌شود که منجر به تبلور مجدد دینامیک می‌شود. بدین ترتیب ریزساختار این ناحیه شامل دانه‌های هم

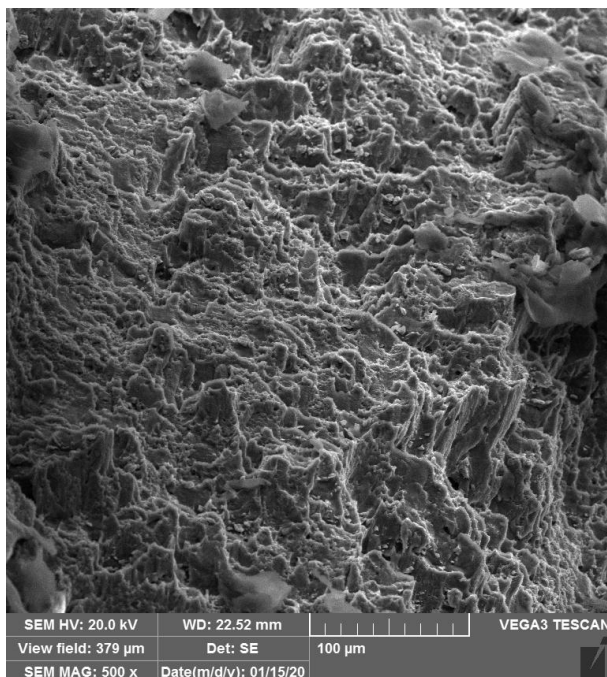
از دلایل اصلی جوش‌پذیری پایین این آلیاژها می‌توان به ریزساختار انجمادی نامناسب، تشکیل تخریل در گرده جوش و افت خواص مکانیکی اشاره کرد. اما این آلیاژها جوش‌پذیری خوبی در حین جوشکاری به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دارند. همان‌طور که پیشتر گفته شد، در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی علاوه بر ایجاد اتصالی عاری از عیب و بهبود ریزساختار، خواص مکانیکی مطلوبی بدست می‌آید. مقایسه نتایج پژوهش‌های پیشین ذکر شده در جدول 6 نیز موید این مطلب است. با مقایسه خواص مکانیکی اتصال همجنس و غیرهمجنس AA7039 و AA5019 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی (جدول 5) با پژوهش‌های پیشین (جدول 6) نتایج مهمی بدست می‌آید:

1- خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم جوشکاری شده به روش‌های ذوبی بسیار پایین است. بر خلاف آن خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم جوشکاری شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی بیشتر بوده و مورد قبول است.

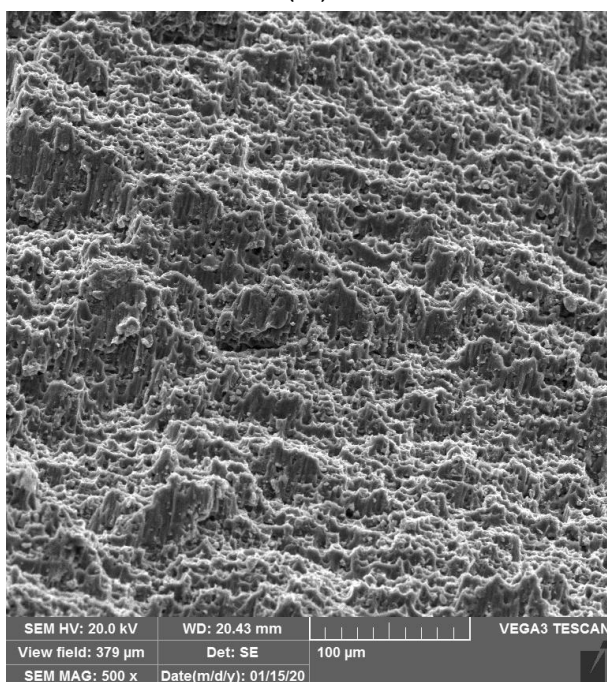
2- راندمان اتصال همجنس و غیرهمجنس اغلب آلیاژهای آلومینیم جوشکاری شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی پس از گذشت حدود سه دهه از پیدایش این روش و پیشرفت‌های روزافزون در این زمینه در حدود 85%-80 است.



شده، ترکیبی از مکانیزم شکست نرم و ترد است. در سطح مقطع شکست نمونه‌های جوشکاری شده همجنس 5019، به طور عمده توسط دیمپل‌های ریز و یکنواخت پوشیده شده است که نمایانگر مکانیزم شکست نرم است. اما در سطح شکست نمونه جوشکاری شده غیرهمجنس، علی‌رغم اینکه بخش کوچکی از سطح شکست، توسط دیمپل‌های ریزی پوشیده شده است، عمده سطح شکست با صفحات شکست کلیواژی بزرگی پوشیده شده است.



(الف)



(ب)

محور با اندازه بسیار ریزتر از فلز پایه است. در ریزساختار ناحیه اغتشاشی آلیاژهای آلومینیم رسوب سخت شونده (نظیر AA7039)، رسوبات استحکام‌ده قابل مشاهده نیستند که یا به دلیل حرارت بالای فرایند در زمینه حل شده‌اند و یا اینکه در نتیجه اغتشاش شدید ایجاد شده توسط ابزار به ذرات بسیار ریز شکسته شده و در زمینه به صورت یکنواخت پخش شده‌اند. با دور شدن از ناحیه اغتشاش، میزان حرارتی که به قطعه می‌رسد کاهش یافته، به نحوی که ناحیه متأثر از حرارت دمایی در حدود  $250^{\circ}\text{C}$  را تجربه می‌کند. این دما برای انحلال رسوبات فاز دوم کافی است و حل شدن این رسوبات، محلول جامد فوق اشباعی از دانه‌های آلومینیم  $\alpha$  برجای می‌ماند. بدین ترتیب با حذف رسوبات و از بین رفتن اثر قفل‌کنندگی مرزدانه‌ها توسط آنها و همچنین تجربه دمای بالا، رشد دانه در ناحیه متأثر از حرارت رخ می‌دهد.

همان‌طور که در شکل 4-ب مشاهده شد، محل شکست نمونه‌های جوشکاری شده همجنس، بعد از آزمون کشش، از محل فلز پایه است. اما محل شکست نمونه جوشکاری شده غیرهمجنس، از میان ناحیه جوش می‌باشد. از محل شکست قطعات می‌توان چنین برداشت کرد که برای قطعات جوشکاری شده همجنس، ناحیه جوش از یکنواختی خوبی برخوردار بوده و علاوه بر اینکه عاری از عیب است و استحکام مطلوبی دارد، سبب شده است که شکست قطعه از ناحیه فلز پایه رخ بدهد. در عین حال، در قطعه جوشکاری شده غیرهمجنس، ناحیه جوش نسبت به سایر نواحی از استحکام کمتری برخوردار بوده که سبب شده است، شکست قطعه از این ناحیه رخ بدهد. از طرفی ممکن است، در ناحیه جوش نمونه جوشکاری شده غیرهمجنس، اختلاط میان آلیاژهای آلومینیم 5019 و 7039 به خوبی صورت نپذیرفته باشد. از این رو، برای بررسی دقیق‌تر مکانیزم شکست، سطح مقطع شکست نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل 5). در سطح مقطع شکست نمونه‌های جوشکاری شده همجنس 7039، دیمپل‌های ریز با اندازه و شکل متفاوت مشاهده می‌شود که بیانگر مکانیزم شکست نرم است. در سطح شکست نمونه‌های جوشکاری شده برخی دیمپل‌ها عمیق‌تر و بزرگ‌تر بوده که در کنار آنها ناحیه‌هایی عاری از نشانه‌های معمول شکست دیده می‌شود. همچنین در برخی نقاط، ذرات شکسته شده‌ای مشاهده می‌شود که به نظر می‌رسد رسوب‌های ترد  $\text{MgZn}_2$  باشند [45].

در این صورت شکست این ذرات ترد می‌تواند آغازگر شکست قطعه باشد. بدین ترتیب مکانیزم شکست نمونه‌های جوشکاری

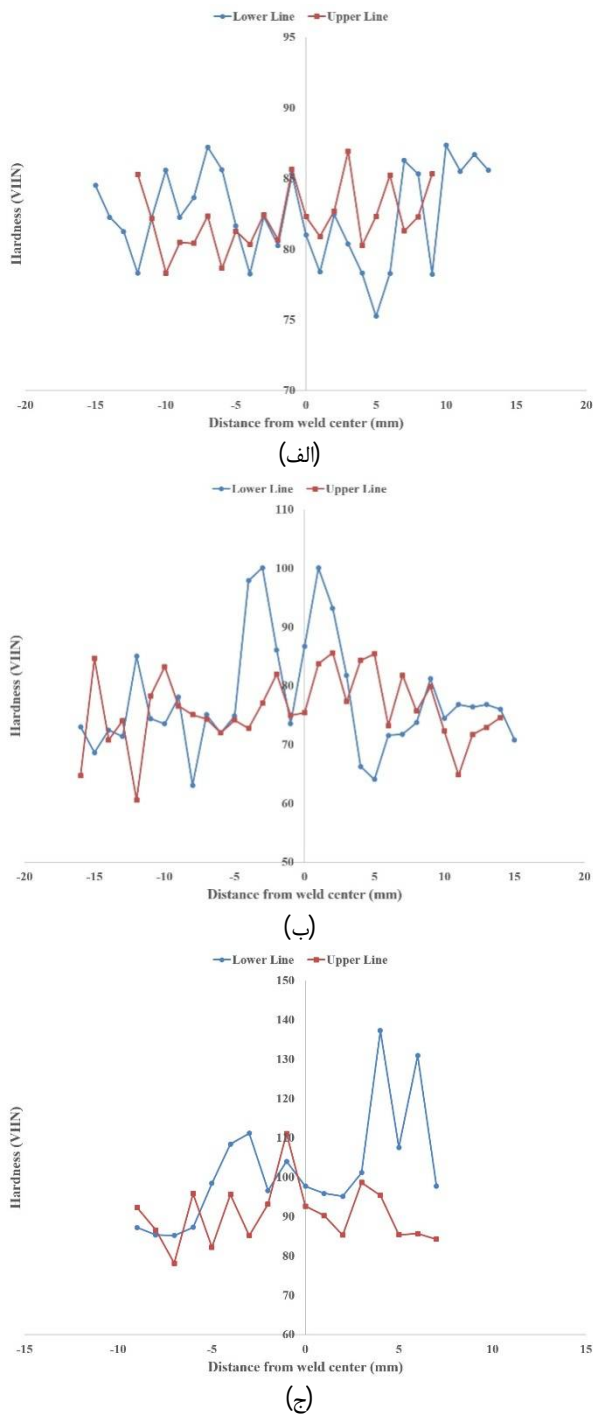
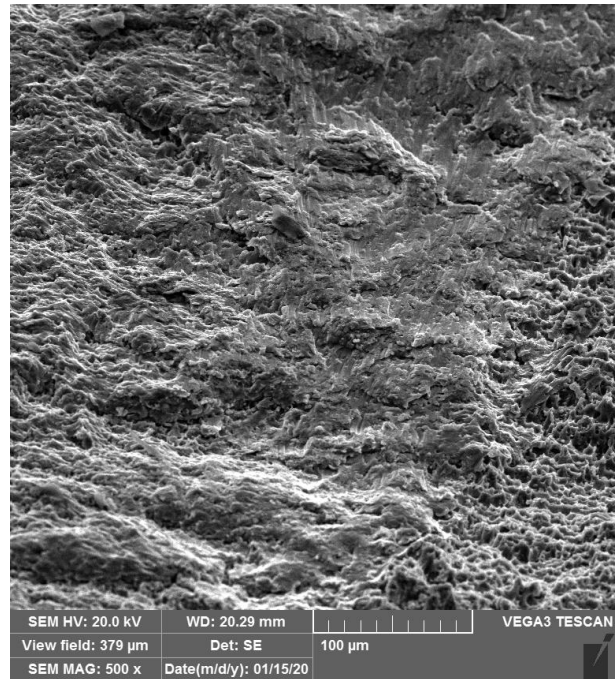


Fig. 6 Microhardness profile of transverse cross section of welds: a. 7039-7039, b. 5019-5019, and c. 7039-5019

شکل 6 پروفیل ریزسختی سطح مقطع عرضی اتصال: (الف) 7039-7039؛ (ب) 5019-5019 و (ج) 7039-5019

این چنین تغییرات سختی از ناحیه اغتشاشی تا فلز پایه، در خصوص آلیاژهای آلومینیم رسوب سخت شونده متعارف بوده و توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است [46-49]. برای اتصال همجنس 5019-5019، وضعیت متفاوتی مشاهده می‌شود؛ بدین ترتیب که میزان سختی در ناحیه اغتشاشی از سایر نواحی



(ج)

Fig. 5 Scanning electron images of fractured surface of welds: a. 7039-7039, b. 5019-5019, and c. 7039-5019

شکل 5 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست اتصال: (الف) 7039-7039؛ (ب) 5019-5019 و (ج) 7039-5019

بدین ترتیب، مکانیزم شکست نمونه جوشکاری شده غیرهمجنس، ترکیبی از شکست نرم و ترد است، به گونه‌ای که مکانیزم شکست ترد، مکانیزم غالب است. پروفیل ریزسختی سطح مقطع عرضی بخش بالایی و بخش پایینی نمونه‌های جوشکاری شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی در شکل 6 مشاهده می‌شود. بر اساس پروفیل ریزسختی اتصال همجنس 7039-7039 مشاهده می‌شود که ناحیه اغتشاشی دارای سختی کمتری نسبت به فلز پایه است اما سختی بالاتری نسبت به ناحیه متأثر از حرارت دارد. در ناحیه اغتشاشی به دلیل تبلور مجدد دینامیک، اندازه دانه به شدت کاهش پیدا می‌کند که بر اساس رابطه هال-پچ، کاهش اندازه دانه سبب افزایش سختی می‌شود. همزمان با کاهش اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی، حرارت اصطکاکی بوجود آمده سبب افزایش دما در این ناحیه تا حدود  $450^{\circ}\text{C}$  می‌شود. از اثرات افزایش دما، انحلال رسوبات استحکام‌دهنده می‌باشد که سبب افت سختی می‌شود. مجموع این دو اثر و بیشتر بودن میزان کاهش سختی در نتیجه انحلال ذرات فاز دوم سبب افت سختی در ناحیه اغتشاشی نسبت به فلز پایه می‌شود. در ناحیه متأثر از حرارت که تنها افزایش دما رخ می‌دهد، رشد دانه‌ها و رسوبات رخ می‌دهد که سبب افت سختی می‌شود.

اندکی است.

- بر اساس طراحی ابزار و وجود گرمابر در شانه پایینی، دمای قطعه در مجاورت شانه پایینی کمتر از دمای قطعه در مجاورت شانه بالایی می‌باشد که سبب افزایش میزان سختی قطعه در مجاورت شانه پایینی می‌گردد.

## 5- مراجع

- [1] P. Dabeer and G. Shinde, "Perspective of Friction Stir Welding Tools," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 5, pp. 13166-13176, 2018.
- [2] G.-Q. Wang, Y.-H. Zhao, and Y.-Y. Tang, "Research Progress of Bobbin Tool Friction Stir Welding of Aluminum Alloys: A Review," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. 33, No. 1, pp. 13-29, 2019.
- [3] K. Fuse and V. Badheka, "Bobbin tool friction stir welding: a review," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 24, No. 4, pp. 277-304, 2018.
- [4] J. Goebel, M. Reimann, A. Norman, and J. F. dos Santos, "Semi-stationary shoulder bobbin tool friction stir welding of AA2198-T851," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 245, pp. 37-45, 2017.
- [5] F. F. Wang, W. Y. Li, J. Shen, Q. Wen, and J. F. dos Santos, "Improving weld formability by a novel dual-rotation bobbin tool friction stir welding," *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 34, No. 1, pp. 135-139, 2018.
- [6] P. Vilaça and W. Thomas, "Friction Stir Welding Technology," in *Structural Connections for Lightweight Metallic Structures (Advanced Structured Materials)*, 2011, pp. 85-124.
- [7] M. S. Shtrikman, "Current state and development of friction stir welding (review). Part 2. Improvement of tools and welding method," *Welding International*, Vol. 22, No. 10, pp. 712-719, 2008.
- [8] B. T. Gibson *et al.*, "Friction stir welding: Process, automation, and control," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, No. 1, pp. 56-73, 2014.
- [9] A. Grimm *et al.*, "Friction Stir welding of Light Metals for Industrial Applications," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 2, pp. S169-S178, 2015.
- [10] M. Kumagai, "Novel solid state joining technology of aluminium: friction stir welding," *Welding International*, Vol. 23, No. 5, pp. 338-344, 2009.
- [11] W. M. Thomas and E. D. Nicholas, "Friction stir welding for the transportation industries," *Materials & Design*, Vol. 18, No. 4, pp. 269-273, 1997/12/01/1997.
- [12] T. Kawasaki, T. Makino, K. Masai, H. Ohba, Y. Ina, and M. Ezumi, "Application of Friction Stir Welding to Construction of Railway Vehicles," *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, Vol. 47, No. 3, pp. 502-511, 2004.

بیشتر است که دلیل آن کاهش شدید اندازه دانه در نتیجه تبلور مجدد دینامیک است. در اتصال غیرهمجنس، مقدار سختی نسبت به هریک از اتصال‌های همجنس، افزایش داشته است. به علاوه مشاهده می‌شود که منحنی توزیع ریزسختی نسبت به مرکز ناحیه اغتشاش نامتقارن است. عدم تقارن توزیع ریزسختی به نوبه خود به عدم یکنواختی سیلان پلاستیک در دو ناحیه اغتشاشی پیشرو و پسرو وابسته است. با توجه به اینکه میزان کرنش پلاستیک در ناحیه پیشرو بیشتر از ناحیه پسرو است، حرارت تغییرفرم بالاتری در این ناحیه تولید می‌شود. تجربه دماهای بالاتر در ناحیه پیشرو سبب رشد بیشتر یا انحلال ذرات استحکام دهنده در آن ناحیه شده و منجر به افت ریزسختی در ناحیه پیشرو در مقایسه با ناحیه پسرو می‌شود [50، 51].

## 4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، آلیاژهای 5019 و 7039 با موفقیت به صورت همجنس و غیرهمجنس به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خود واکنشی، جوشکاری شد. برای بدست آوردن اتصال مطلوب، سرعت چرخش و سرعت پیشروی ابزار به ترتیب 1120rpm و 22mm/min انتخاب شد. قطعات جوشکاری شده به منظور ارزیابی کیفیت اتصال تحت آزمون‌های مخرب و غیرمخرب قرار گرفتند و نتایج زیر بدست آمد:

- استحکام کششی، کرنش شکست و راندمان اتصال بدست آمده برای قطعات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خودواکنشی شده با اختلاف زیاد از قطعات جوشکاری شده با روش‌های جوشکاری ذوبی بیشتر است.

- بعد از اجرای آزمون کشش عرضی، در نمونه‌های اتصال همجنس، قطعات از فلز پایه دچار شکست شدند که نشان‌دهنده کیفیت بالای اتصال است.

- بررسی سطح شکست قطعات جوشکاری شده نشان داد که مکانیزم شکست اتصال‌های همجنس، شکست نرم است در حالیکه برای اتصال غیرهمجنس، مکانیزم شکست ترکیبی از شکست نرم و ترد می‌باشد و مکانیزم ترد غالب است.

- در اتصال همجنس 5019-5019، در ناحیه اغتشاشی با افزایش سختی‌ای در حدود 35% مشاهده می‌شود که دلیل اصلی آن تغییرات ریزساختاری شدید در این ناحیه، در نتیجه فرایند است.

- میزان افت سختی در ناحیه اغتشاشی و ناحیه متأثر از حرارت در نمونه‌های اتصال 7039-7039 به ترتیب 9% و 12/2% است که برای آلیاژهای آلومینیم رسوب سخت شونده مقدار

- Welding and Joining*, Vol. 16, No. 5, pp. 433-439, 2013.
- [26] A. K. Bodukuri, K. Eswaraiah, K. Rajendar, and S. A. A, "Comparison of Aluminum Alloy 5083 properties on TIGW and FSW Processes," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 9, pp. 10197-10201, 2017.
- [27] K. A. Prabha, P. K. Putha, and B. S. Prasad, "Effect of Tool Rotational Speed on Mechanical Properties Of Aluminium Alloy 5083 Weldments in Friction Stir Welding," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 9, pp. 18535-18543, 2018.
- [28] A. K. L. V. Balasubramanian, "The mechanical properties of the GMAW, GTAW and FSW joints of the RDE-40 aluminium alloy," *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, Vol. 3, No. 6, pp. 837-853, 2008.
- [29] V. Devuri, M. M. Mahapatra, S. P. Harsha, and N. R. Mandal, "Effect of Shoulder Surface Dimension and Geometries on FSW of AA7039," *Journal for Manufacturing Science and Production*, Vol. 14, No. 3, 2014.
- [30] M. Kang and C. Kim, "A Review of Joining Processes for High Strength 7xxx Series Aluminum Alloys," *Journal of Welding and Joining*, Vol. 35, No. 6, pp. 79-88, 2017.
- [31] A. Paul, S. Kumar Sinha, P. P. Chattopadhyay, and S. Ganguly, "Anomalous enhancement of strength-ductility combination in FSW joints of AA7039," *Manufacturing Letters*, Vol. 22, pp. 1-5, 2019.
- [32] M. Saeidi, M. Barmouz, and M. K. B. Givi, "Investigation on AA5083/AA7075+Al2O3 Joint Fabricated by Friction Stir Welding: Characterizing Microstructure, Corrosion and Toughness Behavior," *Materials Research*, Vol. 18, No. 6, pp. 1156-1162, 2015.
- [33] I. Kalembe-Rec, M. Wróbel, and M. Kopyściański, "Investigations of Friction Stir Welds between 5083 and 7075 Aluminum Alloys Using EBSD and X-Ray Techniques," *Acta Physica Polonica A*, Vol. 130, No. 4, pp. 996-999, 2016.
- [34] Y. Chen, H. Ding, Z. Cai, J. Zhao, and J. Li, "Microstructural and Mechanical Characterization of a Dissimilar Friction Stir-Welded AA5083-AA7B04 Butt Joint," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 26, No. 2, pp. 530-539, 2016.
- [35] M. M. Z. Ahmed, S. Ataya, M. M. El-Sayed Seleman, H. R. Ammar, and E. Ahmed, "Friction stir welding of similar and dissimilar AA7075 and AA5083," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 242, pp. 77-91, 2017.
- [36] I. Kalembe-Rec, M. Kopyściański, D. Miara, and K. Krasnowski, "Effect of process parameters on mechanical properties of friction stir welded dissimilar 7075-T651 and 5083-H111 aluminum alloys," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 97, No. 5-8, pp. 2767-2779, 2018.
- [37] C. Sharma and V. Upadhyay, "Friction Stir [13] G. Çam and S. Mistikoglu, "Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 6, pp. 1936-1953, 2014.
- [14] V. M. Magalhães, C. Leitão, and D. M. Rodrigues, "Friction stir welding industrialisation and research status," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 23, No. 5, pp. 400-409, 2017.
- [15] M. M. Shtrikman, "Current state and development of friction stir welding Part 3. Industrial application of friction stir welding," *Welding International*, Vol. 22, No. 11, pp. 806-815, 2008.
- [16] G. K. Padhy, C. S. Wu, and S. Gao, "Friction stir based welding and processing technologies - processes, parameters, microstructures and applications: A review," *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-38, 2018.
- [17] L. H. Shah and M. Ishak, "Review of Research Progress on Aluminum-Steel Dissimilar Welding," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 29, No. 8, pp. 928-933, 2014.
- [18] T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia, "Friction stir welding of dissimilar alloys – a perspective," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 15, No. 4, pp. 266-270, 2013.
- [19] J. L. Song, S. B. Lin, C. L. Yang, C. L. Fan, and G. C. Ma, "Analysis of intermetallic layer in dissimilar TIG welding-brazing butt joint of aluminium alloy to stainless steel," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 15, No. 3, pp. 213-218, 2013.
- [20] W. Wang, Z. Cao, K. Liu, X. Zhang, K. Zhou, and P. Ou, "Fabrication and Mechanical Properties of Tungsten Inert Gas Welding Ring Welded Joint of 7A05-T6/5A06-O Dissimilar Aluminum Alloy," *Materials (Basel)*, Vol. 11, No. 7, Jul 6 2018.
- [21] E. Mercan, Y. Ayan, and N. Kahraman, "Investigation on joint properties of AA5754 and AA6013 dissimilar aluminum alloys welded using automatic GMAW," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019.
- [22] S. Meco, L. Cozzolino, S. Ganguly, S. Williams, and N. McPherson, "Laser welding of steel to aluminium: Thermal modelling and joint strength analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 247, pp. 121-133, 2017.
- [23] V. Paradiso, F. Rubino, P. Carlone, and G. S. Palazzo, "Magnesium and Aluminium alloys Dissimilar Joining by Friction Stir Welding," *Procedia Engineering*, Vol. 183, pp. 239-244, 2017.
- [24] M. A. Naziri and A. Rabiezhadeh, "Assessment of using the floating bobbin tool for double sided friction stir welding of aluminium," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 52-62, 2020. (in Persian فارسی)
- [25] A. Tronci, R. McKenzie, R. M. Leal, and D. M. Rodrigues, "Microstructural and mechanical characterisation of 5XXX-H111 friction stir welded tailored blanks," *Science and Technology of*

- minimise defects and maximise fatigue life in 5083-H321 aluminium alloy," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, No. 3-4, pp. 341-354, 2008.
- [45] C. Sharma, D. K. Dwivedi, and P. Kumar, "Influence of in-process cooling on tensile behaviour of friction stir welded joints of AA7039," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 556, pp. 479-487, 2012.
- [46] G. D'Urso, C. Giardini, S. Lorenzi, M. Cabrini, and T. Pastore, "The Effects of Process Parameters on Mechanical Properties and Corrosion Behavior in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys," *Procedia Engineering*, Vol. 183, pp. 270-276, 2017.
- [47] D. Venkateswarlu, P. Nageswara rao, M. M. Mahapatra, S. P. Harsha, and N. R. Mandal, "Processing and Optimization of Dissimilar Friction Stir Welding of AA 2219 and AA 7039 Alloys," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 24, No. 12, pp. 4809-4824, 2015.
- [48] T. S. Rao, G. M. Reddy, and S. R. K. Rao, "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA7075-T651 aluminum alloy thick plates," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 6, pp. 1770-1778, 2015.
- [49] M. Zeinali, G. H. Khalaf, and A. Rabiezadeh, "Friction Stir Welding of 6061 al alloy by floating bobbin tool," *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 50, No. 4, pp. 79-83, 2021. (in Persian فارسی)
- [50] H. J. Aval, S. Serajzadeh, and A. H. Kokabi, "Theoretical and experimental investigation into friction stir welding of AA 5086," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 52, No. 5-8, pp. 531-544, 2010.
- [51] L. E. Murr, "A Review of FSW Research on Dissimilar Metal and Alloy Systems," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 8, pp. 1071-1089, 2010.
- Welding of Dissimilar Aluminum Alloys AA5086 and AA7039," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1240, 2019.
- [38] M. M. Abd Elnabi, A. B. Elshalakany, M. M. Abdel-Mottaleb, T. A. Osman, and A. El Mokadem, "Influence of friction stir welding parameters on metallurgical and mechanical properties of dissimilar AA5454-AA7075 aluminum alloys," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, No. 2, pp. 1684-1693, 2019.
- [39] M. Krishnan and S. K. Subramaniam, "Investigation of Mechanical and Metallurgical Properties of Friction Stir Corner Welded Dissimilar Thickness AA5086-AA6061 Aluminium Alloys," *Materials Research*, Vol. 21, No. 4, 2018.
- [40] C. S. a. V. U. a. A. Tripathi, "Effect of Welding Processes on Tensile Behavior of Aluminum Alloy Joints," *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Vol. 9, No. 12, pp. 2051 - 2054, 2015.
- [41] A. K. Lakshminarayanan and V. Balasubramanian, "Comparison of RSM with ANN in predicting tensile strength of friction stir welded AA7039 aluminium alloy joints," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 19, No. 1, pp. 9-18, 2009.
- [42] C. Sharma, D. K. Dwivedi, and P. Kumar, "Effect of post weld heat treatments on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of Al-Zn-Mg alloy AA7039," *Materials & Design*, Vol. 43, pp. 134-143, 2013.
- [43] G. S. Brar, V. Chawla, and H. S. Grover, "Comparing mechanical and corrosion behaviour of TIG & FSW weldments of AA5083-H321," *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 10, No. 45, pp. 1-10, 2017.
- [44] H. Lombard, D. G. Hattingh, A. Steuwer, and M. N. James, "Optimising FSW process parameters to