

## تأثیر عملیات حرارتی پیرسازی بر خواص اتصال غیرمشابه آلیاژهای آلومینیوم AA 2024 به AA 7075 جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی

بابک صفربالی، مرتضی شمعیان، عبدالمجید اسلامی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۱۰؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۲۱)

### چکیده

در این تحقیق تأثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی اتصال غیرمشابه آلیاژهای T6-7075 و T4-2024 بررسی شد. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با پارامترهای سرعت چرخشی 1140 rpm و سرعت پیشروی 32 mm/min انجام شد. نمونه های جوشکاری شده تحت فرآیندهای مختلف عملیات حرارتی پیرسازی در دما و زمان های متفاوت قرار گرفتند. مشاهدات ریزساختاری، مشخصه یابی و خواص مکانیکی روی اتصال جوشکاری شده قبل و بعد از عملیات حرارتی در عرض مقطع جوش انجام شد. نتایج نشان داد عملیات حرارتی پس از جوشکاری باعث رشد غیر عادی دانه ها می شود که اثر منفی روی خواص مکانیکی اتصال دارد، در حالی که تشکیل رسوبات ریز و یکنواخت در مناطق اتصال جوش باعث بهبود استحکام و سختی می شود. یافته شد که عملیات حرارتی بر اساس فرآیند T6-7075 و براساس فرآیند T6-2024 به ترتیب بیشترین و کمترین اثر را در بازیابی استحکام اتصال جوش و عملیات حرارتی دارند. در آزمون کشش شکست نمونه جوشکاری شده در مرز بین ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی و ناحیه متأثر از حرارت در سمت پسر (7075) رخ می دهد، در صورتی که با بکارگیری عملیات حرارتی پس از جوشکاری شکست در منطقه اغتشاش اتفاق می افتد. شکست نمونه جوشکاری شده غالباً درون دانه ای و شکست نمونه های عملیات حرارتی شده بیشتر بصورت بین دانه ای بود.

**کلمات کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، عملیات حرارتی، خواص مکانیکی، آلیاژ 7075، آلیاژ 2024.

## Effect of Aging Heat Treatment on Joint Properties of Dissimilar Friction Stir Welded 2024-T4 and 7075-T6 Aluminum Alloys

B. Safarballi, M. Shamanian, A. Eslami

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(Received 1 December 2017 ; Accepted 12 September 2018)

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: babak.safarballi@gmail.com

## Abstract

In present study, the effect of heat treatment after friction stir welding dissimilar welds 7075-T6 and 2024-T4 aluminum alloys were investigated. Friction stir welding was performed at a constant rotation speed of 1140 rpm and welding speed 32 mm/min. After welding samples are taken under various heat treatment processes at different aging temperature and time period. Microstructural observations, phase analysis characterization and mechanical properties were performed on welded before and after heat treatment in cross section of welds joint. The results showed that post-weld heat treatment causes abnormal grain growth turns destructive effect on the mechanical properties, while formation of fine and uniform precipitation recovery strength and ductility of welds joints. It is found heat treatment based on 7075-T6 and 2024-T6- procedure has highest and lowest impact on the restore of weld strength. Tensile test indicate that fracture occurred on the interface between TMAZ and HAZ in retreating side (7075) at as-weld joint, if that failure happens in the stir zone by applying PWHT. Surface fracture suggested fractures in PWHT samples are predominantly inter-granular, while in as-weld joint the fractures of joints are mostly trans-granular.

**Keywords:** Friction Stir Welding, Heat treatments, Microstructure, Mechanical properties.

## 1- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم بخصوص انواع با قابلیت جوشکاری ضعیف همچون آلیاژهای آلومینیوم گروه ۲xxx و ۷xxx محسوب می شود [۵].

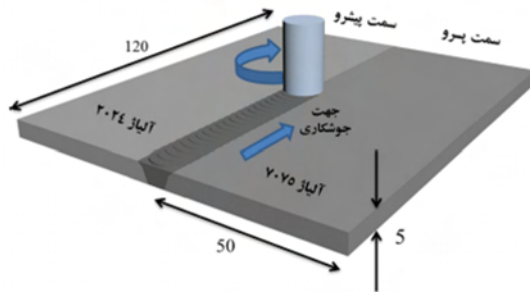
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم موجب می شود دما در ناحیه اغتشاش به حدود  $400-550^{\circ}\text{C}$  برسد. در چنین دمای بالایی رسوبات در آلیاژهای آلومینیوم می تواند درشت یا به داخل زمینه آلومینیوم حل شود، که بستگی به نوع آلیاژ و حداکثر دما دارد [۶]. بنابراین لزوم بکارگیری عملیات حرارتی بعد از جوشکاری آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر آلومینیوم نظیر سری ۲xxx و ۷xxx جهت کسب خواص مکانیکی مطلوب ضروری به نظر می رسد .

در برخی مطالعات اثر عملیات حرارتی پس از جوشکاری (PWHT) روی جوش اصطکاکی اغتشاشی مشابه آلیاژهای AA ۲۰۲۴ و AA ۷۰۷۵ به طور مجزا بررسی شده است. از آن جمله می توان به تحقیق هاکان آیدین و همکاران اشاره کرد، تاثیر PWHT بر خواص مکانیکی اتصال آلیاژ ۲۰۲۴-T4 جوشکاری شده با روش اصطکاکی اغتشاشی بررسی شد. فرایند PWHT باعث رشد غیرعادی دانه ها در ناحیه جوش شد، که افت در ریزسختی منطقه جوش در مقایسه با فلز پایه اتصال را در پی داشت. همچنین نشان داده شد عملیات پیرسازی T6(190  $^{\circ}\text{C}$ -10h) بیشترین تاثیر را روی افزایش خواص مکانیکی اتصال ۲۰۲۴-T4 در پی دارد [۷]. در تحقیق دیگری که توسط ژیلی هو و همکاران انجام شد، اثر عملیات

آلیاژ ۷۰۷۵ از آلیاژهای گروه Al-Zn-Mg-Cu آلومینیوم می باشد. آلیاژهای گروه ۷xxx از پراستحکام ترین آلیاژهای آلومینیوم هستند. این آلیاژها به دلیل داشتن استحکام بالا، چگالی پایین، چقرمگی شکست بالا، پایداری حرارتی نسبتاً خوب ساختار میکروسکوپی، عموماً در ساخت قطعات مورد استفاده در صنایع هوافضا بکار می رود [۱]. آلومینیوم ۲۰۲۴ تجاری نیز، یک سیستم آلیاژی Al-Cu-Mg از سری ۲xxx آلیاژهای پایه آلومینیوم است. امروزه این آلیاژ در کنار صنعت هواپیماسازی در دیگر صنایع که نیاز به آلیاژ سبک با استحکام بالا دارند استفاده می شود [۲]. اتصال این آلیاژها به طور معمول برای ساخت اجزا اسکلت هواپیما چون بدنه و بال های هواپیما استفاده می شود. برای مثال پنل بدنه هواپیما ترکیبی از پوسته آلیاژ ۲۰۲۴ و رشته های استحکام دهنده از آلیاژ ۷۰۷۵ است [۵].

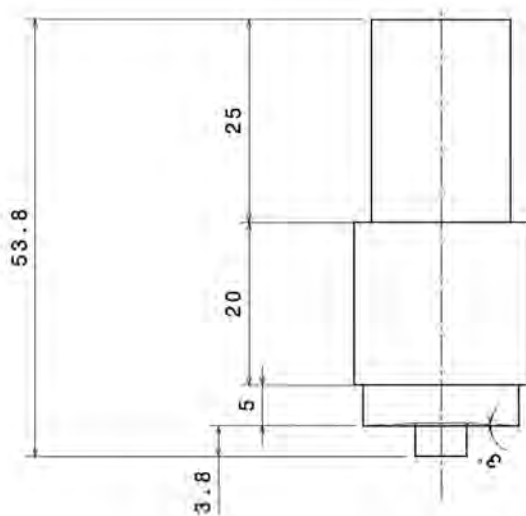
این آلیاژها هنگامی که با روش های معمول ذوبی جوشکاری می شوند، میزانی از عیوب را همچون تخلخل، ترک گرم، کاهش استحکام و انعطاف پذیری در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) از خود نشان می دهند [۳]. از این رو، فرایندهای اتصال در حالت جامد همچون فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) می تواند جهت حذف برخی از عیوب در جوشکاری ذوبی متداول بکار گرفته شود. این فرایند اتصال توسط انجمن جوشکاری کمبریج انگلستان (TWI) در سال ۱۹۹۱ توسعه یافت [۴]. FSW روش مناسبی برای اتصال

انتخاب شد.



شکل ۱- شماتیک هندسه اتصال و فرایند جوشکاری مورد استفاده در این پژوهش

پارامترهای جوشکاری بر اساس مقدار استحکام کششی اتصال جوشکاری شده انتخاب شد، بطوریکه در پارامتر جوشکاری مذکور ماکزیمم مقدار استحکام کششی بدست آمد. ابزار جوشکاری مورد استفاده از جنس فولاد گرم کار H13 بود. هندسه و ابعاد ابزار در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲- هندسه و ابعاد ابزار مورد استفاده در این پژوهش (اعداد بر حسب میلی متر).

جهت اعمال سیکل های عملیات حرارتی پس از جوشکاری، ابتدا نمونه ها جهت عملیات آنیل انحلالی در دمای  $460^{\circ}\text{C}$ ، به مدت زمان ۲ ساعت قرار داده شدند. پس از پایان عملیات محلول سازی پنج سیکل جهت عملیات پیرسازی تعیین شد؛ که زمان و دمای بکاررفته در هر سیکل در جدول (۲) آمده است. جهت تعیین خواص مکانیکی اتصال حاصل، از آزمون کشش و ریزسختی استفاده شد. بدین منظور، نمونه های کشش عمود بر

حرارتی بعد از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ریزساختار و رفتار تغییر شکل پلاستیک جوش آلیاژ ۲۰۲۴ بررسی شد. آنها نشان دادند که تغییر شکل پلاستیک اتصال PWHT به نسبت همگن بود، بطوریکه هم فلز پایه و هم ناحیه اتصال تغییر فرم پلاستیک زیادی از خود نشان داد و کاهش در ازدیاد طول اتصال جوشکاری شده بطور کامل توسط PWHT بهبود پیدا کرد [۸]. بایزید و همکاران اثر عملیات حرارتی سیکلی<sup>۱</sup> (CST) بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ ۷۰۷۵ آلومینیوم جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی بررسی کردند. یک ریزدانه سازی مشخص بعد از بکار گرفتن FSW بدست آمد در حالیکه اندازه دانه بطور مشخص بعد از CST تغییر نکرد. CST استحکام کششی و ازدیاد طول را بهبود می بخشد در حالیکه توزیع سختی ناحیه اتصال همگن می شود [۹]. همانطور که اشاره شد، در زمینه جوشکاری غیر مشابه آلیاژهای آلومینیوم تحقیق خاصی در رابطه با عملیات حرارتی پس از جوشکاری آلیاژهای غیر مشابه پس از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام نشده است. از این رو هدف این پروژه بررسی تاثیر عملیات حرارتی پیرسازی بر روی خواص اتصال جوش FSW آلیاژهای غیر مشابه ۲۰۲۴ AA و ۷۰۷۵ AA می باشد.

## 2- مواد و روش ها

در این پژوهش از آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ (در حالت پیرسازی شده طبیعی، T4 و آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در حالت T6 به ضخامت ۵ میلی متر استفاده شد. ترکیب شیمیایی این دو آلیاژ توسط دستگاه کوانتومتری تعیین شد که در جدول (۱) آورده شده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از دستگاه فرز انجام شد، به گونه ای که قطعات در حالت لب به لب قرار گرفتند و جهت جوشکاری عمود بر راستای نورد ورق ها بود. هندسه اتصال در شکل (۱) آورده شده است. آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در سمت پیشرو و آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در سمت پسرو در کنار یکدیگر قرار گرفته اند. در طی این پژوهش سرعت چرخشی ابزار ۱۱۴۰ rpm و سرعت پیشروی  $32\text{mm/min}$

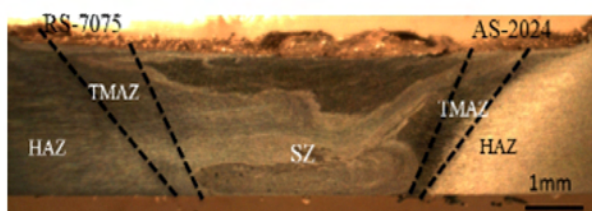
جدول ۱- ترکیب شیمیایی عناصر آلیاژ ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ آلومینیوم (برحسب درصد وزنی)

Al	V	Cr	Ti	Mn	Fe	Zn	Mg	Cu	آلیاژ آلومینیوم
پایه	۰/۱۶۲	۰/۳۹۱	۰/۱۱۶	۰/۱۶۵	۰/۱۶۳	۵/۲۱	۲/۶۲	۱/۵۸	۷۰۷۵
پایه	۰/۰۱	-	۰/۰۳۹	۰/۴۲۵	۰/۱۲۳	-	۱/۴۴۳	۴/۰۸۹	۲۰۲۴

جدول ۲- مشخصات فرایندهای پیرسازی اعمال شده بر روی اتصال جوش FSW

مشخصه تمپر	دما (C)	زمان (ساعت)
T6-2024	۱۹۰	۱۰
T6-7075	۱۲۰	۲۴
T <sub>1</sub>	۱۷۰	۱۲
T <sub>2</sub>	۱۷۰	۱۶
T <sub>3</sub>	۱۷۰	۲۰

مشخص است، اتصال بدست آمده حاوی هیچ نوع عیبی همچون عیوب تونلی یا عیب اتصال جزئی نمی باشد.



شکل ۳- تصویر ماکروسکوپی از مقطع عرضی جوش

جوش مطابق با استاندارد ASTM E8 تهیه شد [۱۰]. به منظور بررسی ریزساختار نواحی مختلف اتصال حاصل از میکروسکوپ های نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. جهت حکاکی مقاطع جوش از محلول حکاکی کلر استفاده شد. پس از آزمون کشش به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل سطوح شکست مورد بررسی قرار گرفت تا ارتباط بین پارامترهای فرایند بروضعیت سطوح شکست مشخص گردد. جهت تعیین فازهای تشکیل شده در حین جوشکاری از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیز طیفسنجی توزیع انرژی (EDS) و دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

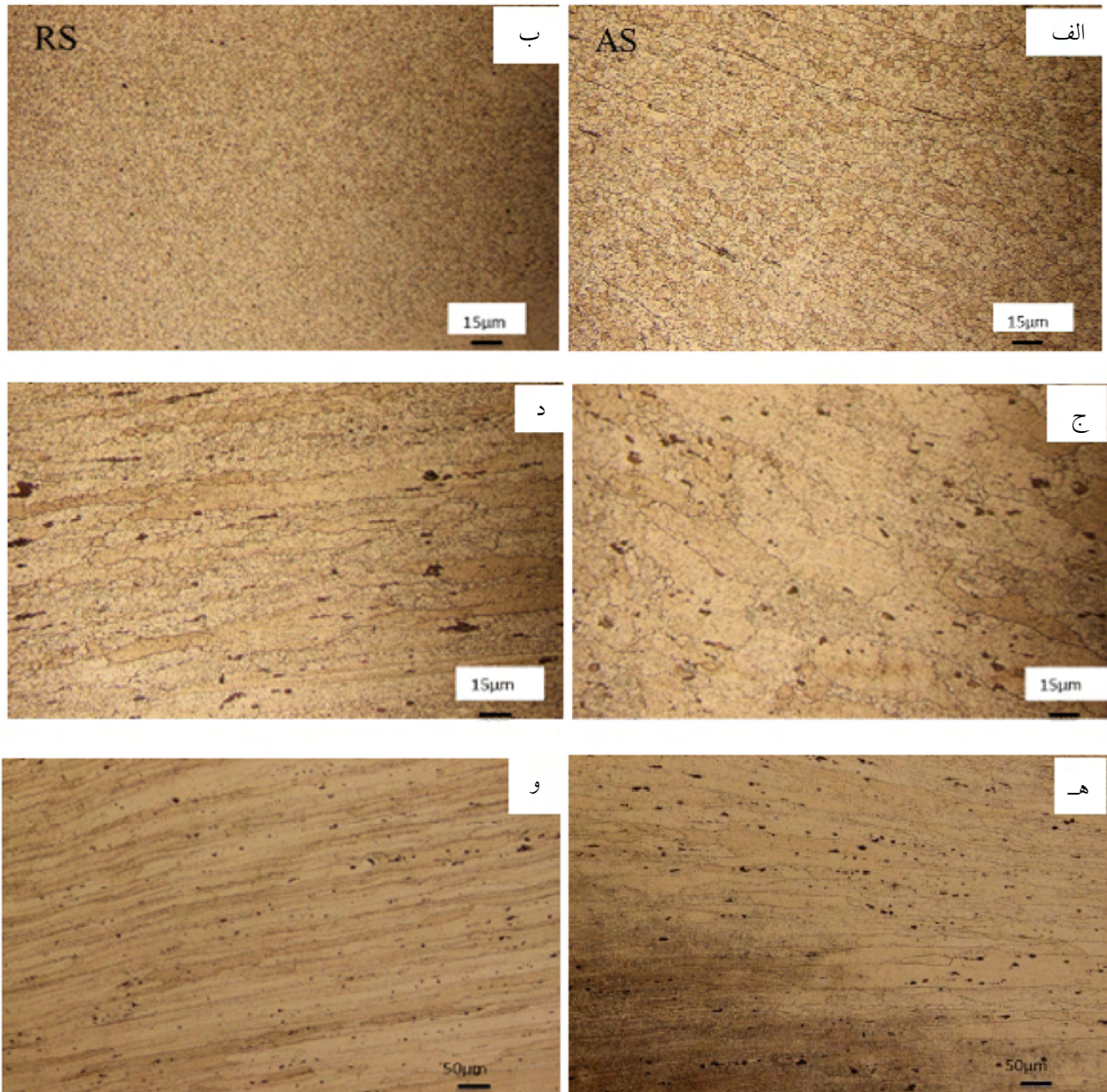
#### ۳-۱- بررسی ماکروساختار

تصویر ماکروسکوپی جوش حاصل در شکل (۳) مشاهده می شود. اتصال غیر مشابه جوش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای T6-۷۰۷۵ و T4-۲۰۲۴ شامل ریزساختارهای مختلف است: ناحیه اغتشاش (SZ)، ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) و متاثر از حرارت (HAZ). هر ناحیه سیکل حرارتی و میزان تغییر شکل متفاوتی را تجربه می کند، که ریزساختارهای مختلفی را موجب می شود. همان طور که از تصاویر ماکروساختار

#### ۳-۲- بررسی ریزساختار

در شکل (۴-الف و ۴-ب) تصاویر ناحیه اغتشاش در سمت پیشرو و پسرو به ترتیب آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، افزایش حرارت ورودی و تغییر شکل پلاستیک شدید بطور همزمان تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه اغتشاش رخ می دهد و موجب ریز شدن دانه ها می شود [۱۱]. قابل توجه است که اندازه دانه ها در ناحیه پسرو نسبت به ناحیه پیشرو کمتر است. این مسئله بدین علت است که ناحیه پیشرو ناحیه اغتشاش دمایی بیشتری را در حین جوشکاری تجربه می کند. تصویر ج و د ساختار دانه ها در TMAZ در دو سمت پیشرو و پسرو به ترتیب نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، دانه ها از بالا به سمت پایین کشیده و چرخیده می شوند.





شکل ۴- تصویر ریزساختار از مقاطع مختلف جوش، الف) ناحیه اغتشاش در سمت پیش رو، ب) ناحیه اغتشاش در سمت پس رو، ج) TMAZ در سمت پیش رو، د) TMAZ در سمت پس رو، ه) HAZ در سمت پیشرو، و) HAZ در سمت پس رو

3-3- پیرسازی بر اساس سیکل عملیات حرارتی 2024-T6  
تصویر ریزساختار اتصال جوش بعد از عملیات حرارتی براساس سیکل T6 آلیاژ ۲۰۲۴ در شکل (۵) دیده می شود. همان گونه که در قسمت قبل اشاره شد، عملیات محلول سازی یک سری تغییرات مشخص را در اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی پدید می آورد. همانطور که در تصاویر نوری از ریزساختار نمونه تحت عملیات حرارتی 2024-T6 قرار گرفته مشخص

ریز شدن دانه ها همچون ناحیه اغتشاش اتفاق نمی افتد و اندازه دانه ها به مراتب نسبت به ناحیه اغتشاش بزرگتر است. در شکل (۴) تصاویر (ه) و (و) ناحیه HAZ را در دو آلیاژ ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ به ترتیب نشان می دهد. در این ناحیه تنها دما بالا رفته و تحت تاثیر تغییر شکل قرار نمی گیرد [۱۲]. بنابراین در این منطقه نیز درشت شدن رسوبات و کمی تغییر در اندازه دانه رخ می دهد.

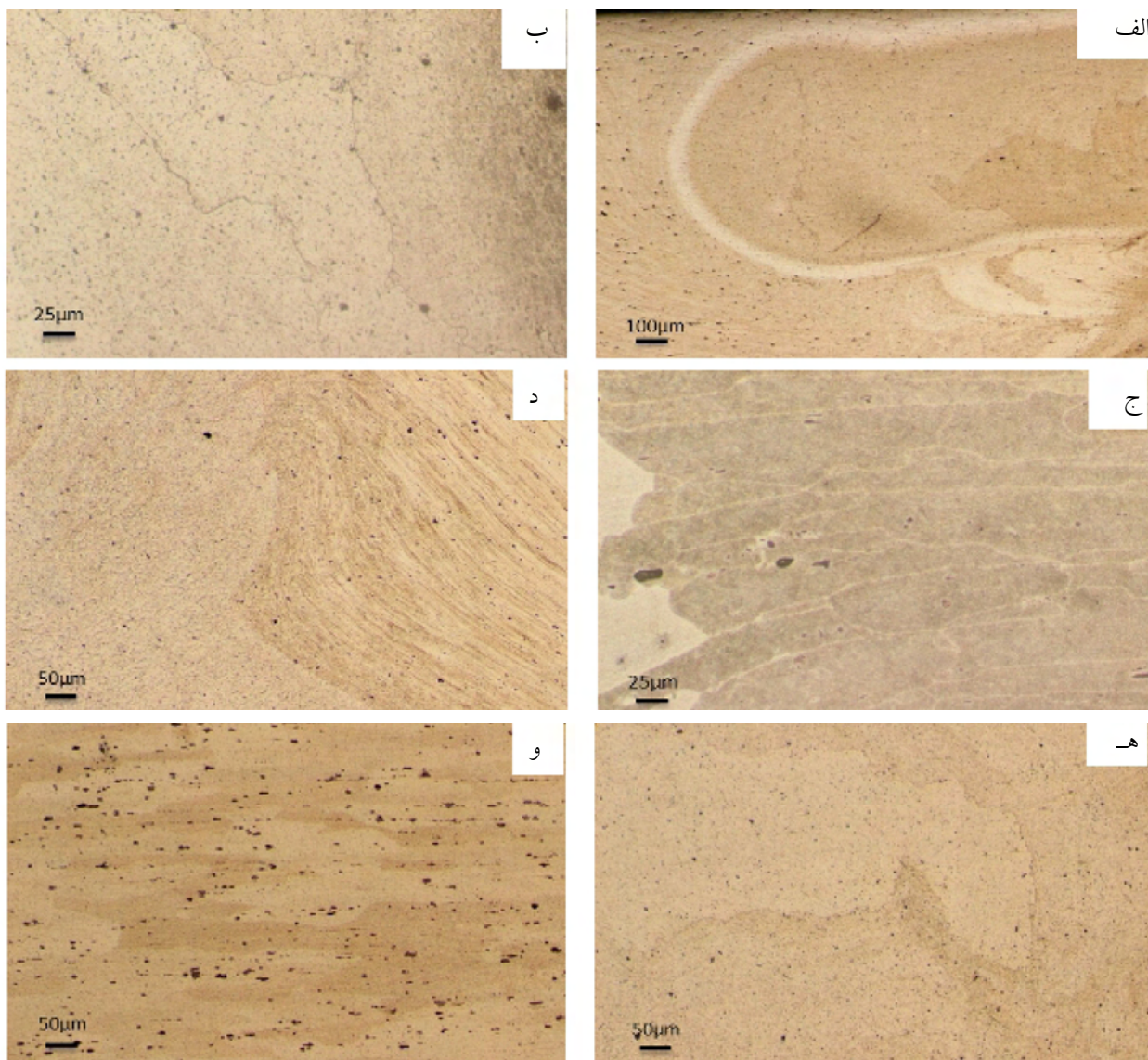


در تصویر شکل (۵-ج) ساختار دانه در ناحیه TMAZ آلیاژ ۲۰۲۴ آورده شده است دانه ها در ناحیه TMAZ نیز رشد کرده اند، اما شدت رشد آنها بدلیل پایین بودن دمای TMAZ حین جوشکاری، نسبت به رشد دانه در ناحیه اغتشاش کمتر است. علاوه براین، پس از عملیات حرارتی از میزان چرخش و کشیدگی دانه ها در نمونه جوشکاری شده کاسته شده است.

### 3-4- پیرسازی براساس سیکل عملیات حرارتی T6- 7075

تصاویر ریزساختار مناطق مختلف جوش اصطکاکی اغتشاشی بعد از عملیات حرارتی بر اساس سیکل T6 آلیاژ ۷۰۷۵ در

است، دانه ها به شدت رشد کرده و پدیده رشد غیرعادی دانه ها بخصوص در سمت TMAZ آلیاژ ۷۰۷۵ بوجود آمده است (شکل ۴-الف). رشد دانه ها در برخی از نواحی منطقه اغتشاش رخ داده و در برخی نواحی دیگر ساختار ریزدانه حاصل شده پس از جوشکاری به همان صورت باقی مانده است (شکل ۵-ب). درشت شدن دانه ها در بعضی نواحی می تواند بدین علت باشد که نیروی محرکه ترمودینامیکی برای رشد دانه ها بیشتر از نیروی قفل کنندگی ذرات برای جلوگیری از مهاجرت مرزدانه می باشد. کاهش نیروی قفل کنندگی ذرات ناشی از حل شدن رسوبات در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می باشد [۱۳].



شکل ۵- تصویر ریزساختار نوری از اتصال جوش پس از عملیات حرارتی بر اساس سیکل T6-۲۰۲۴ (الف-ج) و T6-۷۰۷۵ (د-و):

(الف، د) سمت پس رو، (ب، ه) منطقه اغتشاش، (ج، و) سمت پیش رو. TMAZ

در ناحیه اغتشاش جوش تشخیص داده شده اند. در این سیکل به این دلیل که دما جهت جوانه زنی و رشد رسوبات در آلیاژ  $Al_2CuMg$  مناسب نیست، رسوبات استحکام بخش  $Al_2CuMg$  نیروی محرکه لازم جهت تشکیل را بدست نمی آورند.

### 3-6- بررسی ریزسختی

پروفیل سختی اندازه گیری در مقطع عرضی جوش اصطکاکی اغتشاشی و پس از سیکل های مختلف عملیات حرارتی در شکل (7) آورده شده است.

پس از جوشکاری بعلت اینکه در ناحیه اغتشاش دانه های ریز و هم محور در اثر مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی پیوسته بوجود می آید، علیرغم انحلال رسوبات در این ناحیه، سختی نسبت به نواحی HAZ و TMAZ افزایش می یابد، اما نسبت به فلز پایه کاهش یافته است. پروفیل ریزسختی یک نرم شدگی در TMAZ و HAZ اتصال جوش در مقایسه با BM و SZ از خود نشان می دهد.

در مرز بین HAZ و TMAZ در سمت آلیاژ  $7075$  سختی مقدار  $110HV$  دارد، در حالیکه در مرکز جوش سختی به حدود  $160HV$  می رسد. دلیل از دست دادن سختی در TMAZ و HAZ در اثر سرد شدن و فرآیند سازی رسوبات استحکام بخش در اثر سیکل حرارتی است که در حین فرآیند FSW بوجود می آید. نکته قابل توجه دیگر، افت سختی ناحیه مرزی بین HAZ و TMAZ در آلیاژ  $7075$  نسبت به این ناحیه در سمت آلیاژ  $2024$  کمتر است، علیرغم اینکه آلیاژ  $7075$  قبل از جوشکاری سختی بالاتری نسبت به آلیاژ  $2024$  دارد.

این می تواند به این علت باشد که رسوبات آلیاژ  $7075$  پایداری حرارتی کمتری دارند و در دمای پایین تری حل می شوند [15 و 14].

مقادیر سختی در عرض ناحیه جوش اتصالات PWHT وابسته به سیکل عملیات حرارتی تغییر می کند. مقادیر سختی در سیکل عملیات حرارتی  $T6-2024$  در مقایسه با سایر فرآیندهای عملیات حرارتی کمترین میزان سختی در نواحی مختلف جوش دارد.

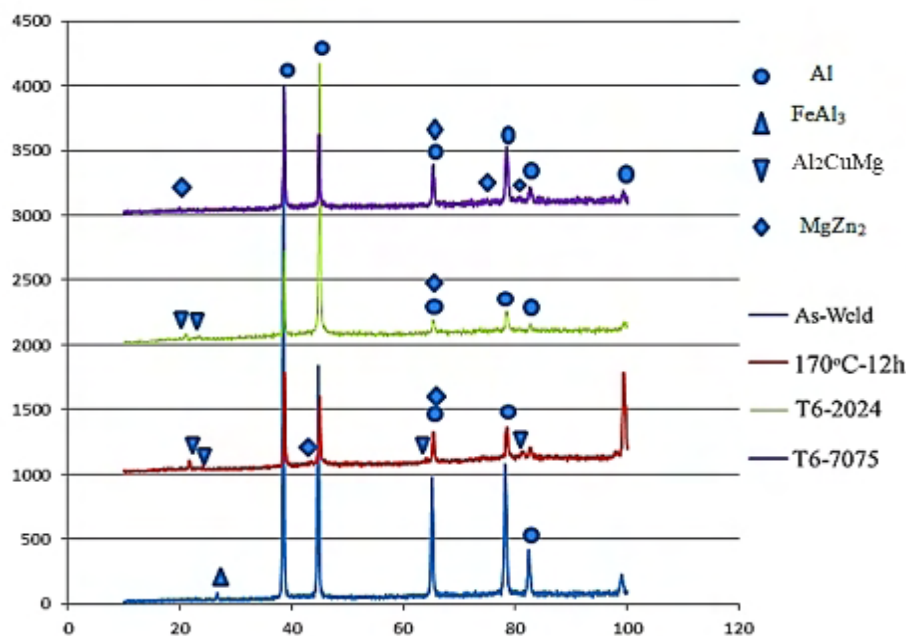
شکل (5-د) و (5-و) نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، رشد دانه ها در منطقه اغتشاش اتصال به مانند سیکل  $T6-2024$  دیده می شود، اما شدت آن نسبت به سیکل  $T6-2024$  کمتر است. از آنجایی که این سیکل برای آلیاژ  $7075$  مناسب است، در سمت آلیاژ  $7075$  توزیع ریز و یکنواختی از رسوبات استحکام بخش  $MgZn_2$  شکل می گیرد. از طرف دیگر، بدلیل اینکه دما در سیکل  $T6$  آلیاژ  $7075$ ،  $120^\circ C$  انتخاب می شود، این دما جهت پیرسازی آلیاژ  $2024$  پایین بوده و سبب فرآیند سازی این آلیاژ نمی شود.

### 3-5- مشخصه یابی فازها با استفاده از تفرق اشعه ایکس

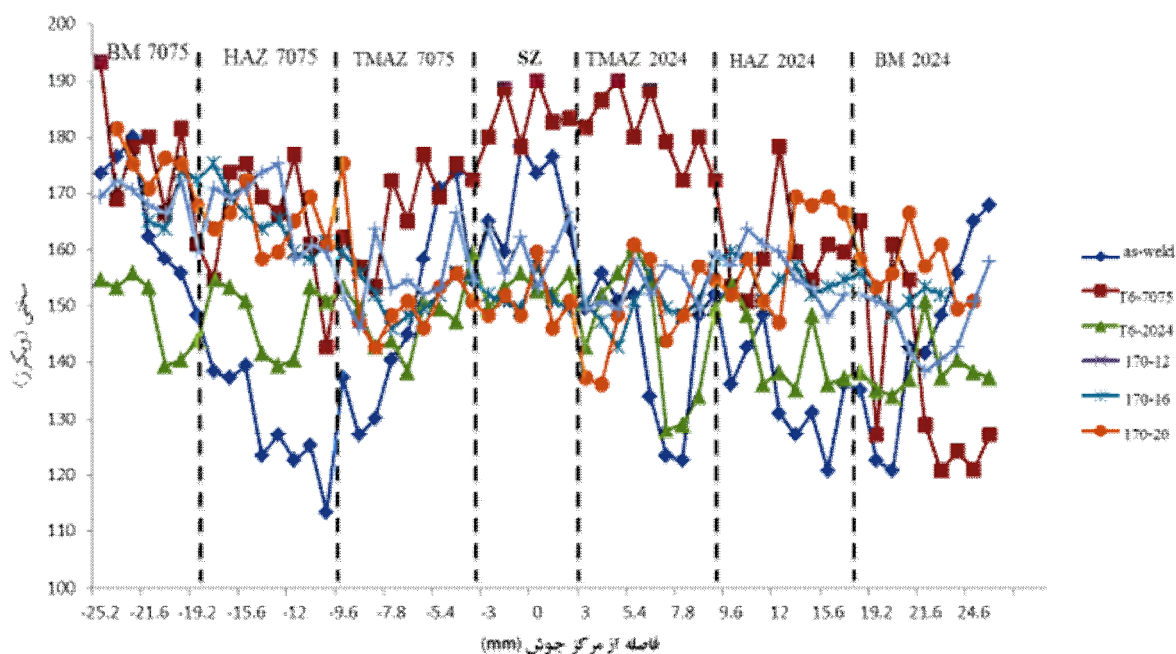
نتایج مشخصه یابی فازها با استفاده از تفرق اشعه X در ناحیه اغتشاش اتصال در شکل (6) آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود در ناحیه اغتشاش نمونه جوشکاری شده قبل از بکارگیری عملیات حرارتی تمامی رسوبات استحکام بخش نظیر  $\eta'(MgZn_2)$  و  $S(Al_2CuMg)$  حل شده و تنها رسوبات حاوی عناصری مانند Fe ترکیب  $(FeAl_3)$  در ساختار باقی مانده است. شناخته شده است که رسوبات میله ای شکل نظیر  $Al_2CuMg$  در دماهای بالا در حین جوشکاری انحلال پذیرند، در حالیکه رسوبات حاوی Fe و Mn در دماهای بالا حل نمی شوند. با اعمال سیکل عملیات حرارتی رسوبات در مناطق مختلف جوش جوانه زنی و رشد می کنند.

مطابق با نتایج XRD در شرایط عملیات حرارتی در دمای  $170^\circ C$  و زمان 12 ساعت رسوبات  $Al_2CuMg$  و  $MgZn_2$  تشکیل می شوند؛ اما مشخص است که میزان رسوبات  $Al_2CuMg$  بیشتری در منطقه اغتشاش بعد از این سیکل عملیات حرارتی بوجود می آید. با اعمال عملیات حرارتی براساس سیکل  $T6-2024$  رسوبات  $Al_2CuMg$  که بعنوان رسوب استحکام بخش در این آلیاژ به حساب می آیند، بیشتر تشخیص داده می شوند و برخی پیک ها نیز نشان می دهد احتمال اینکه رسوب  $MgZn_2$  تشکیل شده باشد وجود دارد.

سرانجام با اعمال عملیات حرارتی پس از جوشکاری براساس سیکل  $T6$  آلیاژ  $7075$  بیشتر رسوبات استحکام بخش  $MgZn_2$



شکل ۶- الگوهای XRD ناحیه مرکز جوش ها: الف) جوشکاری شده، ب) PWHT در دمای ۱۷۰ درجه سانتی گراد و زمان ۱۲ ساعت، ج) T6-2024، د) T6-7075.



شکل ۷- پروفیل ریزسختی در نمونه جوشکاری شده و پس از فرایندهای مختلف حرارتی در مقطع عرضی جوش.

اعمالی سیکل ۷۰۷۵-T6 بیشترین افزایش در سختی را در نواحی مختلف اتصال از خود نشان می‌دهد. دلیل این افزایش تشکیل رسوباتی ریز و با توزیع یکسان در تمامی نواحی اتصال است. در بین فرایندهای اعمالی تحت دمای ۱۷۰ °C تفاوت

در ناحیه اغتشاش نسبت به نمونه جوشکاری شده کاهش یافته و در نواحی HAZ و TMAZ در دو سمت سختی مقداری نسبت به نمونه جوشکاری شده افزایش می‌یابد و به حدود HV ۱۴۰ می‌رسد. در بین سایر فرایندهای عملیات حرارتی



استحکام تسلیم به مقادیر  $406 \text{ MPa}$  و  $311 \text{ MPa}$  می‌رسد. همچنین در بین سیکل های عملیات حرارتی اعمالی در دمای  $170^\circ \text{C}$ ، زمان 16 ساعت (T2) بالاترین استحکام را نسبت به زمان های 12 و 20 ساعت دارد. از طرف دیگر، ازدیاد طول در شرایط عملیات حرارتی در دمای  $170^\circ \text{C}$  و زمان 12 (T1) ساعت کمترین مقدار (0.5/6) را دارد و در شرایط عملیات حرارتی براساس T6 آلیاژ  $7075$  علاوه بر استحکام، انعطاف پذیری افزایش یافته است. این افزایش در استحکام و ازدیاد طول نشان می‌دهد، چقرمگی شکست اتصال جوش پس از عملیات حرارتی براساس T6 آلیاژ  $7075$  بهبود می‌یابد. افزایش در چقرمگی در اتصال جوش عملیات حرارتی شده براساس سیکل T6 آلیاژ  $7075$  به توزیع ریز و یکنواخت رسوبات در مناطق مختلف جوش نسبت داده می‌شود. این رسوبات بعنوان مانعی در برابر حرکت نابجایی‌ها و همچنین مرزخانه‌ها عمل می‌کنند و همراه با افزایش استحکام، انعطاف پذیری نیز افزایش می‌یابد [16]. در نتیجه خواص استاتیک اتصالات جوش اصطکاکی اغتشاشی وابستگی بیشتری به توزیع رسوبات سخت کننده نسبت به اندازه دانه دارند [17]. شکست در اتصال جوش قبل از عملیات حرارتی در فصل مشترک بین TMAZ و HAZ در سمت پسر (آلیاژ  $7075$ ) رخ می‌دهد. از این رو عملیات حرارتی انتخاب شده بر اساس سیکل آلیاژ  $7075$  باعث بهبود چشمگیر استحکام در این ناحیه بعنوان ضیف‌ترین قسمت در مناطق جوش می‌شود. پس از اعمال تمامی این فرآیندهای عملیات حرارتی مشاهده شد، شکست بدلیل رشد غیرعادی دانه‌ها در ناحیه اغتشاش اتفاق می‌افتد.

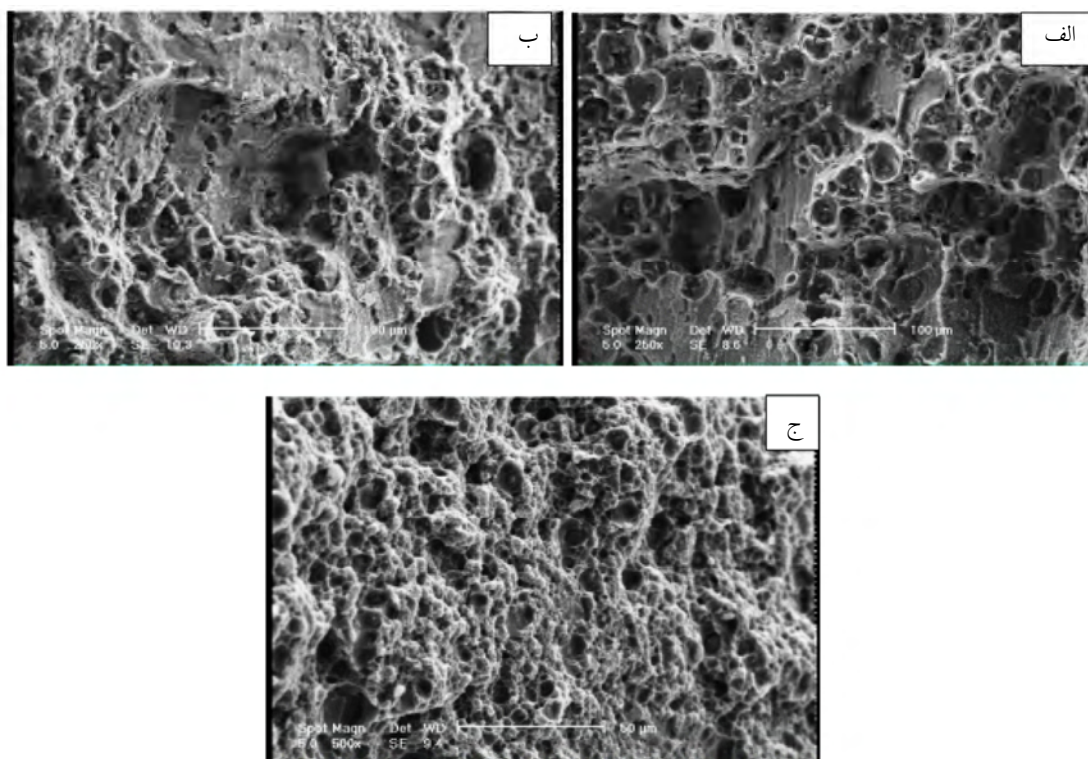
چندانی در افزایش سختی وجود ندارد و مدت زمان 16 ساعت (T2) اثر بیشتری روی بهبود سختی دارد. دلیل افزایش بینابینی سختی در این فرآیند این است که دمای  $170^\circ \text{C}$  باعث فرایرسازی در آلیاژ  $7075$  می‌شود و در آلیاژ  $2024$  زمان های انتخاب شده جهت رسیدن سختی به بیشینه خود کافی نمی‌باشند. از طرف دیگر، این فرآیند باعث می‌شود هر دو آلیاژ تقریباً به یک میزان افزایش در سختی نسبت به نمونه جوشکاری شده داشته باشند.

### 3-7- بررسی خواص کششی

نتایج خواص کششی در جدول (3) آورده شده است. فلز پایه آلیاژهای  $7075$  و  $2024$  آلومینیوم قبل از جوشکاری به ترتیب دارای استحکام  $570 \text{ MPa}$  و  $426 \text{ MPa}$  می‌باشند. استحکام کششی و ازدیاد طول در شرایط اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی به ترتیب مقادیر  $381 \text{ MPa}$  و  $9/6\%$  بدست می‌آید. این نشان می‌دهد، کاهش  $34\%$  و  $19\%$  در استحکام اتصال جوش در مقایسه با فلز پایه  $7075$  و  $2024$  در حالت جوشکاری نشده بوجود می‌آید. نتایج آزمون کشش بعد از عملیات حرارتی بهبود خواص کششی برای تمام اتصالات PWHT را نشان می‌دهد. استحکام اتصال جوشکاری شده با عملیات حرارتی T6 آلیاژ  $7075$  به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و در بین پنج سیکل اعمالی بالاترین استحکام را دارا می‌باشد. استحکام نهایی کشش، استحکام تسلیم به ترتیب مقادیر  $453 \text{ MPa}$ ،  $349 \text{ MPa}$  دارد. از طرف دیگر، عملیات حرارتی بر اساس T6 آلیاژ  $2024$  کمترین بهبود در استحکام را در بین سیکل های اعمالی بدست می‌آورد و استحکام نهایی کشش و

جدول 3- خواص کششی اتصالات FSW قبل و بعد از عملیات حرارتی.

سیکل عملیات حرارتی	استحکام کششی نهایی (UTS)	استحکام تسلیم (YS)	ازدیاد طول (%)
As-weld	381	302	9/6
T6-2024	406	311	7/36
T6-7075	453	349	15/2
170C-12h	444	322	5/6
170C-16h	448	334	6/7
170C-20h	429	318	7/1



شکل ۸ - تصویر سطح شکست پس از آزمون شکست، الف) جوشکاری شده، ب) عملیات حرارتی بر اساس سیکل T6-۷۰۷۵، ج) T6-۲۰۲۴.

### 3-8- بررسی سطوح شکست

یابد و همان طور که دیده می شود شکست پس از عملیات حرارتی بیشتر به صورت بین دانه ای (مرزدانه ای) رخ دهد. البته نوع فرآیند اعمالی بر روی میزان انعطاف پذیری تاثیرگذار است. مقایسه انعطاف پذیری پس از فرآیندهای عملیات حرارتی با استفاده از سطوح شکست نیز قابل بررسی است. گزارش شده است که اندازه و عمق حفرات در سطوح شکست می تواند بیانگر میزان انعطاف پذیری در اتصال FSW باشد [۱۸].

اندازه بیشتر حفرات نشان دهنده این است که منطقه تحت کشش بزرگتری در نوک ترک وجود دارد. این اثر منجر به ناحیه پلاستیک بزرگتر در نوک ترک شده و انعطاف پذیری بالاتری بدست می آید [۱۹]. از مقایسه سطوح شکست پس از اعمال این دو سیکل می توان دید، حفرات در سیکل T6 آلیاژ ۷۰۷۵، عمق و اندازه بزرگتری نسبت به حفرات سطح شکست پس از اعمال سیکل T6 آلیاژ ۲۰۲۴ دارند (شکل ۸-ب). این مطلب انعطاف پذیری بالاتر سیکل T6-۷۰۷۵ را که در نتایج آزمون کشش نیز بدست آمده بود، تایید می کند.

سطوح شکست نمونه های تحت آزمون کشش با استفاده از SEM بررسی شد. تصاویر SEM از مرکز نواحی نمونه های کشش بدست آمد، که در شکل (۷) نشان داده شده است. این تصاویر به ترتیب سطح شکست از نمونه کشش بعد از جوشکاری، پس از عملیات حرارتی براساس سیکل T6 آلیاژ ۷۰۷۵ و پس از عملیات حرارتی براساس سیکل T6 آلیاژ ۲۰۲۴ را نشان می دهند. در نمونه جوشکاری شده بیشتر سطح شکست درون دانه ای دیده می شود (شکل ۸-الف). این رفتار شکست به این علت است که در اثر سیکل دمایی که نواحی HAZ و TMAZ در حین جوشکاری تجربه می کنند، رسوبات موجود داخل دانه ها در این نواحی حل و یا درشت می شود. این عوامل سبب می شود استحکام داخل دانه ها نسبت به مرزدانه ها کاهش یابد. با اعمال فرآیندهای عملیات حرارتی، رسوبات داخل دانه ها جوانه زنی و رشد بیشتری پیدا می کنند و توزیع یکنواختی از رسوبات داخل دانه ها تشکیل می شود. این موضوع موجب می شود استحکام داخل دانه ها نسبت به مرزدانه ها افزایش

## 4- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری روی اتصال غیرمشابه آلایزهای ۷۰۷۵ و ۲۰۲۴ آلومینیوم جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی بررسی شد. مشاهدات ریزساختاری نشان داد اتصال FSW باعث حل شدن رسوبات در ناحیه اغتشاش و همچنین درشت شدن آنها در نواحی HAZ و TMAZ می شود، بطوریکه این پدیده در سمت پسر و (آلیاژ ۷۰۷۵) بیشتر ملاحظه می شود. نتایج نشان داد عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر اساس سیکل ۷۰۷۵-T6 بیشترین اثر را در بهبود استحکام کششی و بازیابی سختی دارد. بهبود استحکام پس از این عملیات ناشی از تشکیل رسوباتی ریز و با توزیع یکنواخت در سراسر اتصال بود. شکست نمونه جوشکاری شده از مرز بین HAZ و TMAZ در سمت پسر رخ داد، در حالیکه پس از عملیات حرارتی از ناحیه اغتشاش شکست اتفاق می افتاد. در نمونه جوشکاری شده بیشتر سطح شکست درون دانه ای بود، در صورتی که پس از عملیات حرارتی سطوح شکست غالباً از نوع بین دانه ای دیده می شد.

## منابع

- 1- فتوحی ح، "اصلاح ریزساختار مقاطع جوش آلایز آلومینیوم ۷۰۷۵-T6 ایجاد شده به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۲.
- 2- بهرامی الف، "ارزیابی ریزساختار و رفتار تریبولوژیکی نانو کامپوزیت سطحی آلومینیوم - نیکل ایجاد شده بر سطح آلایز آلومینیوم ۲۰۲۴ با استفاده از فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۴.
- 3- Mathers, G., "The Welding of Aluminum and Its Alloys", 1st Edition, Woodhead Publishing, Cambridge England, 2002.
- 4- رفیعی ر؛ "اتصال غیرمشابه آلایزهای آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۵۰۵۲ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و ارزیابی خواص اتصال"، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۱.
- 5-Song Y., Ynng X., Cui L., "Defect features and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar AA2024-AA7075 aluminum alloy sheets", *Materials and Design*, 2014, Vol.55, pp.9-18.
- 6-Mishra, R.S., JR., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2005, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78.
- 7-Aydn H., Bayram A., Durgun I., "The effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2024-T4 friction stir-welded joints", *Materials and Design*, 2010, Vol.31, pp.2568-2577.
- 8-Zhili H., Shijin Y., Xiaosong W., "Effect of post-weld heat treatment on the microstructure and plastic deformation behavior of friction stir welded 2024", *Materials and Design*, 2011, Vol.32, pp.5050-5050.
- 9- Bayazid S.M., Farhangi H., Asgharzadeh H., "Effect of cyclic solution treatment on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075 Al alloy", *Materials Science & Engineering A*, 2016, Vol.649, pp.293-300.
- 10-ASTM E8-04, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASM International, 2007.
- 11-Fuller C., Mahoney M., Calabrese M., "Evolution of microstructure and mechanical properties in naturally aged 7050 and 7075 Al friction stir welds", *Materials Science and Engineering A*, Vol.527, pp.2233-2240, 2010.
- 12-Mishra, R.S., JR., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- 13-Charit I, Mishra RS, "Abnormal grain growth in friction stir processed alloys", *Scripta Materialia*, Vol.58, pp.367-71, 2008.
- 14-Viana F., Pinto A.M., Santos H.M, "Retrospection and re-ageing of 7075 aluminium alloy: microstructural characterization", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93, pp.54-59, 1999.
- 15-Genevois C., Deschamps A., Denquin A., "Quantitative investigation of precipitation and mechanical behavior for AA2024 friction stir welds", *Acta Materialia*, Vol.53, pp.2447-2458, 2005.
- 16-M. W. MahoneyC. G. RhodesJ. G. FlintoffW. H. Bingel, "Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol.29, pp.1955-1964, 1998.
- 17-Attallah MM, Salem HG., "Friction stir welding parameters: a tool for controlling abnormal grain growth during subsequent heat treatment", *Materials Science and Engineering A*, Vol.391, pp.51-9, 2005.
- 18-Srivatsan TS, Vasudevan S, Park L., "The tensile deformation and fracture behavior of friction stir welded aluminum alloy 2024", *Materials Science and Engineering A*, Vol.466, pp.235-45, 2007.
- 19-Aydn H, Bayram A, Uguz A, Akay SK., "Tensile properties of friction stir welded joints of 2024 aluminum alloys in different heat-treated-state", *Materials and Design*, Vol.30, pp.2211-21, 2009.