نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره 1، بهار و تابستان1398، صفحه 11-1

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

بابک صفربالی، مرتضی شمعانیان، عبدالمجید اسلامی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

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

چکیده

در این تحقیق تاثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی اتصال غیرمشابه آلیاژهای۷۰۷۵ -T6 و۲۰۲۴ -T4 بررسی شد. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با پارامترهای سرعت چرخشی rpm ۱۱۴۰و سرعت پیشروی۳۲ 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 فرآیند۷۰۷۵ -T6 و براساس فرایند۲۰۲۴-T6 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 متاثر از عملیات ترمومکانیکی و ناحیه متاثر از حرارت در سمت پسرو (۷۰۷۵) رخ می دهد، در صورتی که با بکارگیری عملیات حرارتی پس از جوشکاری شکست در منطقه اغتشاش اتفاق می افتد. شکست نمونه جوشکاری شده غالبا 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 ۷۰۷۵، آلیاژ ۲۰۲۴.

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

B. Safarbali, 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.safarbali@gmail.com

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

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

آلیاژ ۷۰۷۵ از آلیاژهای گروه Al-Zn-Mg-Cu آلومینیوم می‌باشد. 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 سری۲xxx آلیاژهای پایه آلومینیوم است. امروزه این آلیاژ در کنار صنعت هواپیماسازی در دیگر صنایع که نیاز به آلیاژ سبک با استحکام بالا دارند استفاده می‌شود[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 رشته‌های 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 متاثر از حرارت (HAZ)[1] از خود نشان می‌دهند [۳]. از این رو، فرایندهای اتصال در حالت جامد همچون فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) می‌تواند 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 آلیاژهای آلومینیوم بخصوص انواع با قابلیت جوشکاری ضعیف همچون آلیاژهای آلومینیوم گروه۲xxx و ۷xxx محسوب می‌شود [۵].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم موجب می‌شود دما در ناحیه اغتشاش به حدود ۴۰۰-۵۵۰ ℃ 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)[2] 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 ℃-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

1-Heat Affected Zone

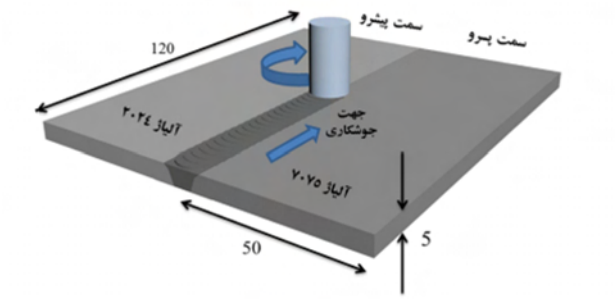
2-Post Weld Heat Treatment

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

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[1] (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 می‌بخشد 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 جوشFSW آلیاژهای غیر مشابه AA ۲۰۲۴ و AA ۷۰۷۵ می‌باشد.

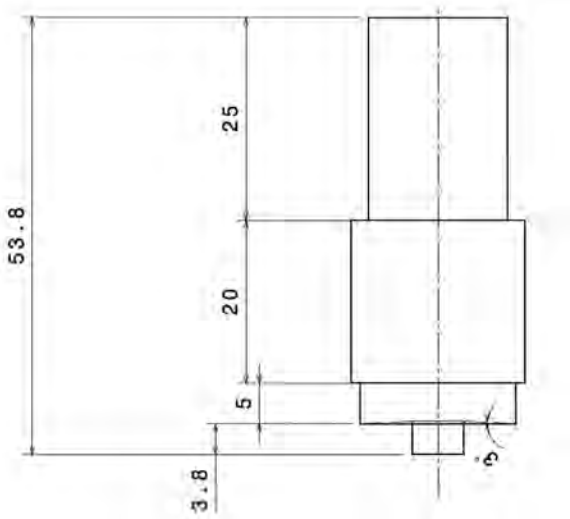
2- مواد و روش ها

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 درکنار یکدیگر قرار گرفته اند. در طی این پژوهش سرعت چرخشی ابزار ۱۱۴۰ rpm و سرعت پیشروی ۳۲mm/min 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 H۱۳ 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℃ ۴۶۰، 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

1-Cyclic Solution Treatment

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

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

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

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

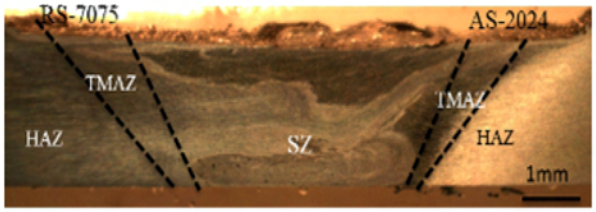
مشخصه تمپر	دما (°C)	زمان (ساعت)
T6-2024	۱۹۰	۱۰
T6-7075	۱۲۰	۲۴
T_1	۱۷۰	۱۲
T_2	۱۷۰	۱۶
T_3	۱۷۰	۲۰

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 کِلر 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 طیف سنجی توزیع انرژی (EDS) و دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل استفاده شد.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی ماکروساختار

تصویر ماکروسکوپی جوش حاصل در شکل(۳) مشاهده می‌شود. اتصال غیر مشابه جوش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای T6-۷۰۷۵ و T4-۲۰۲۴ شامل ریزساختارهای مختلف است: ناحیه‌اغتشاش(SZ)،ناحیه متاثرازعملیات ترمومکانیکی(TMAZ) و متاثر از حرارت(HAZ). هر ناحیه سیکل حرارتی و میزان تغییر شکل متفاوتی را تجربه می‌کند، که ریزساختارهای مختلفی را موجب می‌شود. همان طور که از تصاویر ماکروساختار مشخص است، اتصال بدست آمده حاوی هیچ نوع عیبی همچون عیوب تونلی یا عیب اتصال جزئی نمی‌باشد.

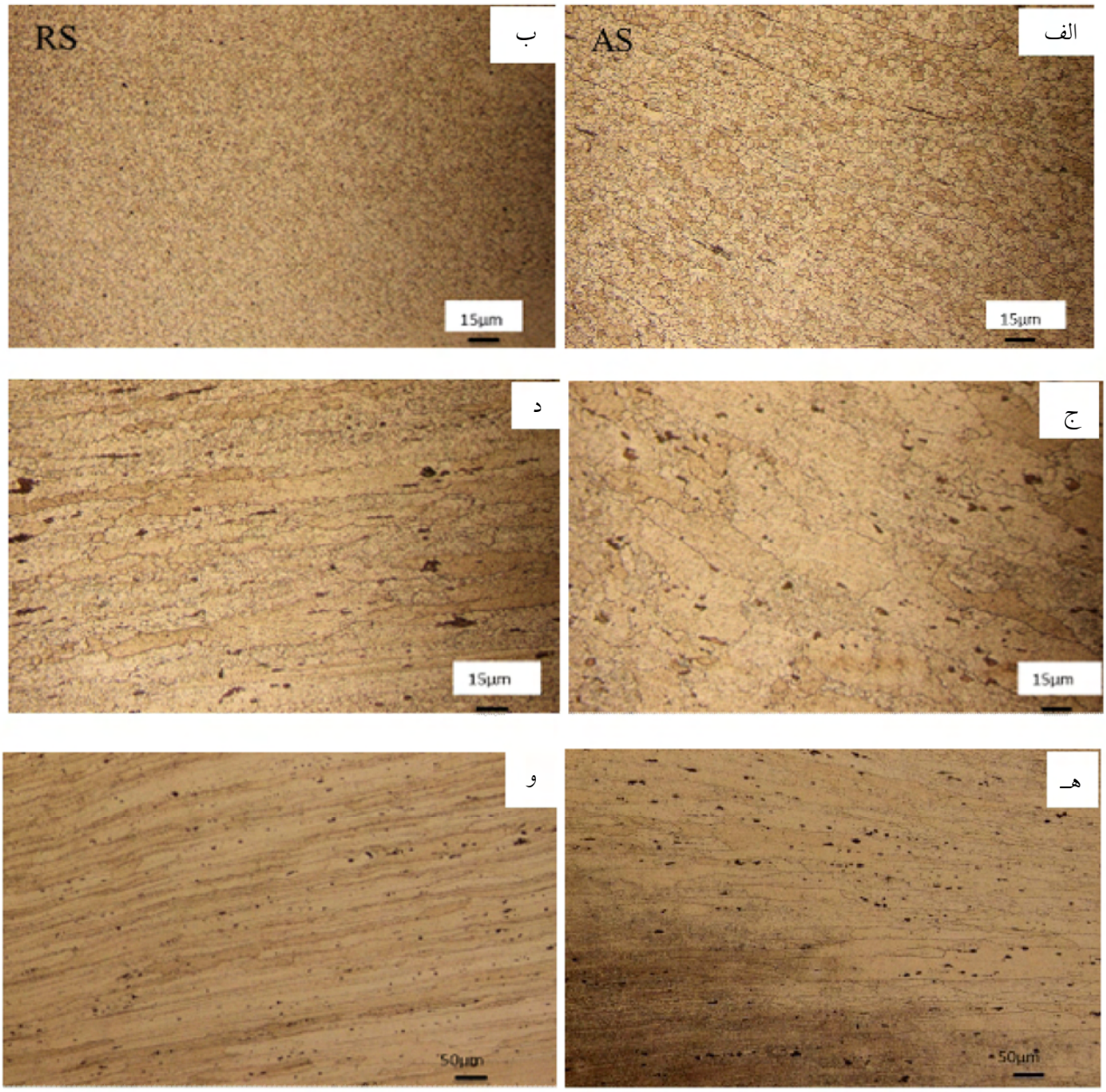


شکل۳- تصویر ماکروسکوپیک از مقطع عرضی جوش

3-2-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 دمای بیشتری را در حین جوشکاری تجربه می‌کند. تصویر ج و د ساختار دانه ها در TMAZ در دو سمت پیشرو و پسرو به ترتیب نشان می دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، دانه ها از بالا به سمت پایین کشیده و چرخیده می‌شوند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



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

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

3-3- پیرسازی بر اساس سیکل عملیات حرارتی2024 -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 حرارتی۲۰۲۴-T6 قرار گرفته مشخص

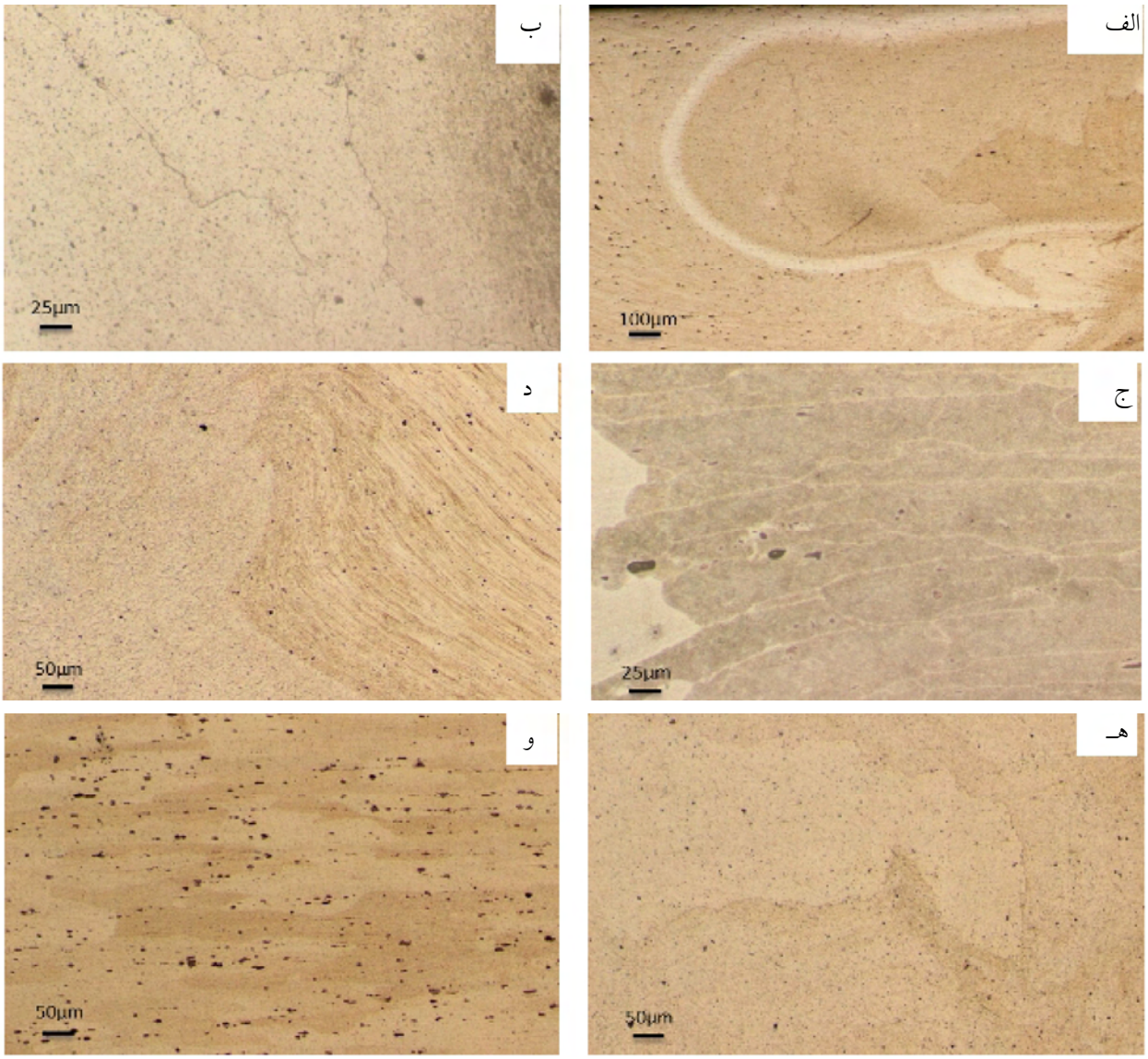
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

است، دانه ها به شدت رشد کرده و پدیده رشد غیرعادی دانه‌ها 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 می‌باشد[۱۳].

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



شکل ۵- تصویر ریزساختار نوری از اتصال جوش پس از عملیات حرارتی بر اساس سیکلT6-۲۰۲۴ (الف-ج) و T6-۷۰۷۵ (د-و):
الف،د) TMAZ سمت پس رو ، ب،ها) منطقه اغتشاش، ج،و) TMAZ سمت پیش رو.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

شکل(۵-د) و۵-و) نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، رشد دانه ها در منطقه اغتشاش اتصال به مانند سیکل T6-۲۰۲۴ دیده می شود، اما شدت آن نسبت به سیکل T6-۲۰۲۴کمتر است. از آنجایی که این سیکل برای آلیاژ ۷۰۷۵ مناسب است، درسمت آلیاژ ۷۰۷۵ توزیع ریز و یکنواختی از رسوبات استحکام بخش $MgZn_2$ شکل می گیرد. از طرف دیگر، بدلیل اینکه دما در سیکل T6 آلیاژ ۷۰۷۵، ۱۲۰ ℃ انتخاب می شود، این دما جهت پیرسازی آلیاژ ۲۰۲۴ پایین بوده و سبب فراپیرسازی این آلیاژ نمی شود.

3-5-مشخصه‌یابی فازها با استفاده از تفرق اشعه ایکس

نتایج مشخصه یابی فازها با استفاده از تفرق اشعه X در ناحیه اغتشاش اتصال در شکل(۶) 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 نمی‌شوند. با اعمال سیکل عملیات حرارتی رسوبات در مناطق مختلف جوش جوانه زنی و رشد می کنند.

مطابق با نتایجXRD در شرایط عملیات حرارتی در دمای ۱۷۰℃ و زمان ۱۲ ساعت رسوبات Al_2CuMg و $MgZn_2$ تشکیل می شوند؛ اما مشخص است که میزان رسوبات Al_2CuMgبیشتری در منطقه اغتشاش بعد از این سیکل عملیات حرارتی بوجود می آید. با اعمال عملیات حرارتی براساس سیکلT6-۲۰۲۴ 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 ۷۰۷۵ بیشتر رسوبات استحکام بخش $MgZn_2$ در ناحیه اغتشاش جوش تشخیص داده شده اند. در این سیکل به این دلیل که دما جهت جوانه زنی و رشد رسوبات در آلیاژ ۲۰۲۴ مناسب نیست، رسوبات استحکام بخش Al_2CuMg نیروی محرکه لازم جهت تشکیل را بدست نمی‌آورند.

3-6- بررسی ریزسختی

پروفیل سختی اندازه گیری در مقطع عرضی جوش اصطکاکی اغتشاشی و پس از سیکل های مختلف عملیات حرارتی در شکل(۷) 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 TMAZو HAZ اتصال جوش در مقایسه با BM و SZ از خود نشان می دهد.

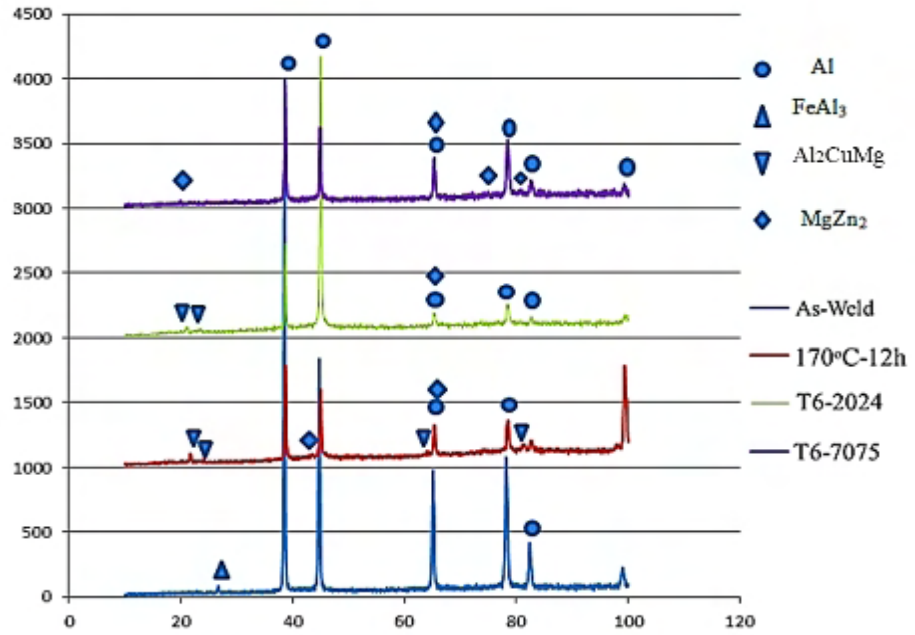
در مرز بین HAZ و TMAZ در سمت آلیاژ ۷۰۷۵ سختی مقدار ۱۱۰HV دارد، در حالیکه در مرکز جوش سختی به حدود ۱۶۰HV می رسد. دلیل از دست دادن سختی در TMAZ و HAZدرشت شدن و فراپیرسازی رسوبات استحکام بخش در اثر سیکل حرارتی است که در حین فرآیند FSW بوجود می‌آید.

نکته قابل توجه دیگر، افت سختی ناحیه مرزی بین HAZ و TMAZدر آلیاژ ۷۰۷۵ نسبت به این ناحیه در سمت آلیاژ ۲۰۲۴ کمتر است، علیرغم اینکه آلیاژ ۷۰۷۵ قبل از جوشکاری سختی بالاتری نسبت به آلیاژ ۲۰۲۴ دارد.

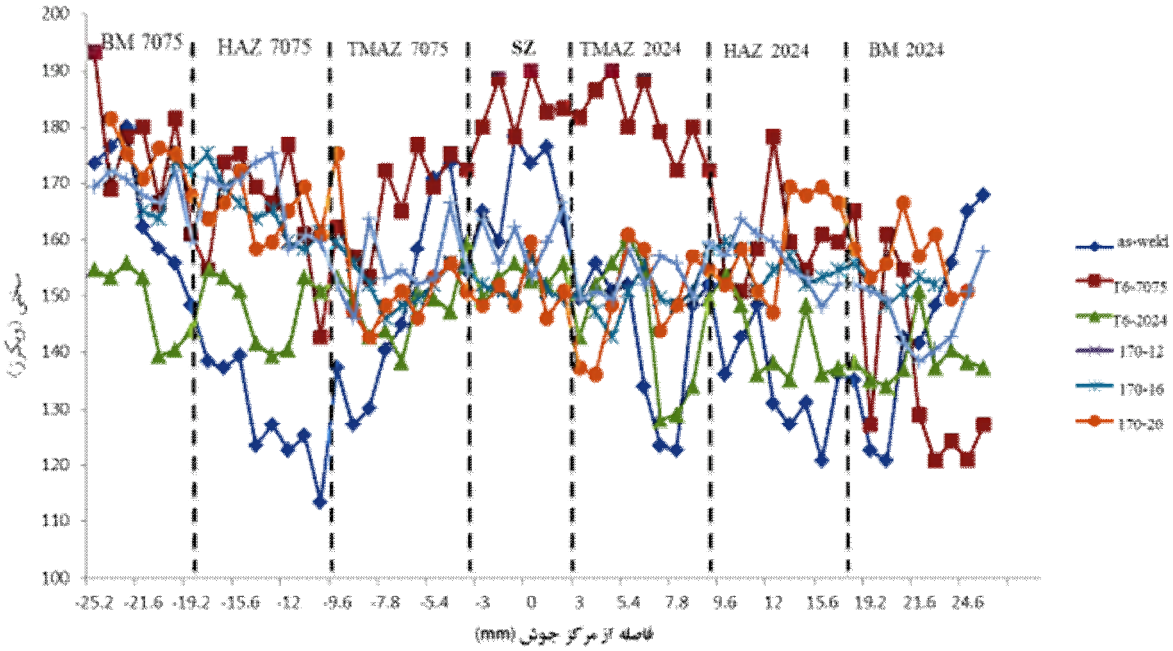
این می تواند به این علت باشد که رسوبات آلیاژ ۷۰۷۵ پایداری حرارتی کمتری دارند و در دمای پایین تری حل می شوند [۱۴و۱۵].

مقادیر سختی در عرض ناحیه جوش اتصالات PWHT وابسته به سیکل عملیات حرارتی تغییر می کند. مقادیر سختی در سیکل عملیات حرارتیT6-۲۰۲۴ در مقایسه با سایر فرآیندهای عملیات حرارتی کمترین میزان سختی در نواحی مختلف جوش دارد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



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 عملیات حرارتی در مقطع عرضی جوش.

در ناحیه اغتشاش نسبت به نمونه جوشکاری شده کاهش یافته و در نواحی TMAZ و HAZ در دو سمت سختی مقداری نسبت به نمونه جوشکاری شده افزایش می یابد و به حدود ۱۴۰ HV می‌رسد. در بین سایر فرآیندهای عملیات حرارتی اعمالی سیکل۷۰۷۵ -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 تفاوت

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

چندانی در افزایش سختی وجود ندارد و مدت زمان ۱۶ ساعت (T2) اثر بیشتری روی بهبود سختی دارد. دلیل افزایش بینابینی سختی در این فرآیند این است که دمای ℃ ۱۷۰باعث فراپیرسازی در آلیاژ ۷۰۷۵ می‌شود و در آلیاژ ۲۰۲۴ زمان های انتخاب شده جهت رسیدن سختی به بیشینه خود کافی نمی‌باشند. از طرف دیگر، این فرآیند باعث می شود هر دو آلیاژ تقریبا به یک میزان افزایش در سختی نسبت به نمونه جوشکاری شده داشته باشند.

3-7- بررسی خواص کششی

نتایج خواص کششی در جدول(۳) آورده شده است. فلز پایه آلیاژهای ۷۰۷۵ و ۲۰۲۴ آلومینیوم قبل از جوشکاری به ترتیب دارای استحکام MPa ۵۷۰ و ۴۲۶ می باشند. استحکام کششی و ازدیاد طول در شرایط اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی به ترتیب مقادیر MPa ۳۸۱ و ۹/۶٪ بدست می آید. این نشان می‌دهد، کاهش ۳۴٪ و ۱۹٪ در استحکام اتصال جوش در مقایسه با فلز پایه ۷۰۷۵ و ۲۰۲۴ در حالت جوشکاری نشده بوجود می‌آید. نتایج آزمون کشش بعد ازعملیات حرارتی بهبود خواص کششی برای تمام اتصالات PWHT را نشان می دهد. استحکام اتصال جوشکاری شده با عملیات حرارتی T6 آلیاژ ۷۰۷۵ به طور قابل توجهی افزایش می یابد و در بین پنج سیکل اعمالی بالاترین استحکام را دارا می باشد.

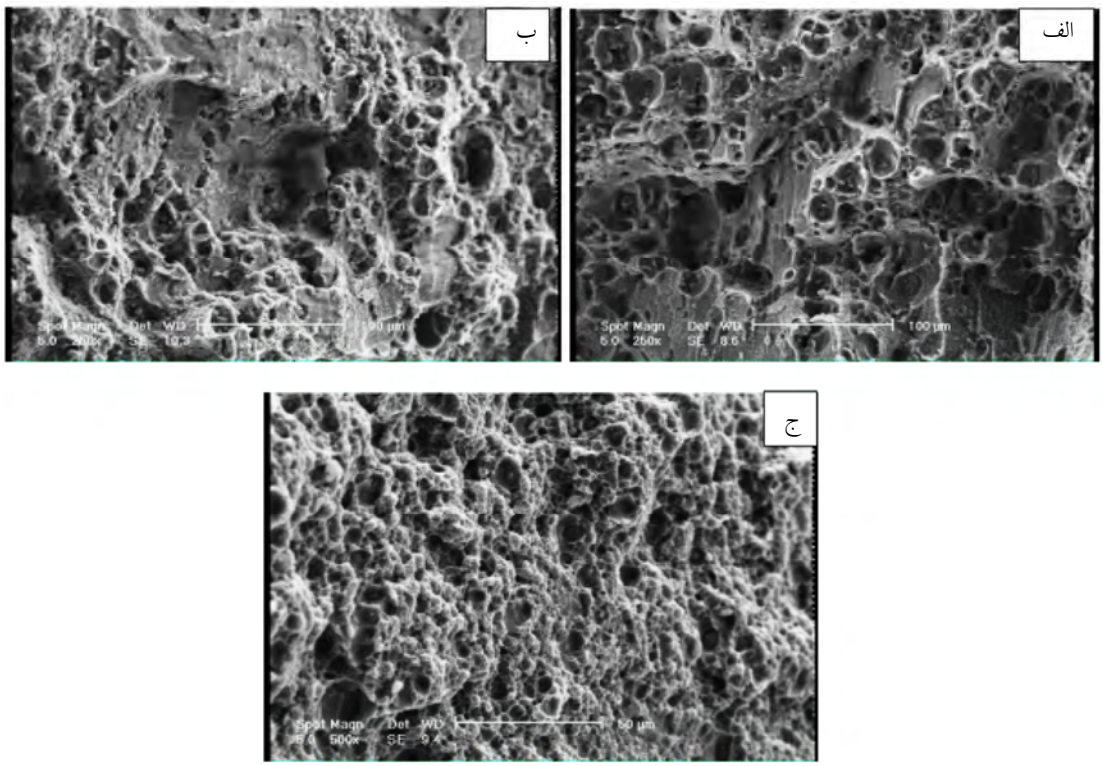
استحکام نهایی کشش، استحکام تسلیم به ترتیب مقادیر ۴۵۳MPa ، MPa ۳۴۹ دارد. از طرف دیگر، عملیات حرارتی بر اساس T6 آلیاژ ۲۰۲۴ کمترین بهبود در استحکام را دربین سیکل های اعمالی بدست می آورد و استحکام نهایی کشش و استحکام تسلیم به مقادیر MPa ۴۰۶ و ۳۱۱MPa می‌رسد. همچنین دربین سیکل های عملیات حرارتی اعمالی در دمای ℃۱۷۰، زمان ۱۶ ساعت (T2) بالاترین استحکام را نسبت به زمان های ۱۲ و ۲۰ ساعت دارد. از طرف دیگر، ازدیاد طول در شرایط عملیات حرارتی در دمای ℃ ۱۷۰ و زمان ۱۲ (T1) ساعت کمترین مقدار (۵/۶٪) را دارد و در شرایط عملیات حرارتی براساس T6 آلیاژ ۷۰۷۵ علاوه بر استحکام، انعطاف‌پذیری افزایش یافته است. این افزایش در استحکام و ازدیاد طول نشان می دهد، چقرمگی شکست اتصال جوش پس از عملیات حرارتی براساس T6 آلیاژ ۷۰۷۵ بهبود می یابد. افزایش در چقرمگی در اتصال جوش عملیات حرارتی شده براساس سیکل T6 آلیاژ ۷۰۷۵ به توزیع ریز و یکنواخت رسوبات در مناطق مختلف جوش نسبت داده می شود. این رسوبات بعنوان مانعی در برابر حرکت نابجایی‌ها و همچنین مرزدانه ها عمل می‌کنند و همراه با افزایش استحکام، انعطاف پذیری نیز افزایش می‌یابد[۱۶]. در نتیجه خواص استاتیک اتصالات جوش اصطکاکی اغتشاشی وابستگی بیشتری به توزیع رسوبات سخت کننده نسبت به اندازه دانه دارند [۱۷].

شکست در اتصال جوش قبل از عملیات حرارتی در فصل مشترک بین TMAZ و HAZ در سمت پسرو (آلیاژ ۷۰۷۵) رخ می دهد. از این رو عملیات حرارتی انتخاب شده بر اساس سیکل آلیاژ ۷۰۷۵ باعث بهبود چشمگیر استحکام در این ناحیه بعنوان ضیف‌ترین قسمت در مناطق جوش می شود. پس از اعمال تمامی این فرآیندهای عملیات حرارتی مشاهده شد، شکست بدلیل رشد غیرعادی دانه ها در ناحیه اغتشاش اتفاق می‌افتد.

جدول۳- خواص کششی اتصالات FSW قبل و بعد از عملیات حرارتی.

سیکل عملیات حرارتی	استحکام کششی نهایی (UTS)	استحکام تسلیم (YS)	ازدیاد طول (٪)
As-weld	۳۸۱	۳۰۲	۹/۶
T6-2024	۴۰۶	۳۱۱	۷/۳۶
T6-7075	۴۵۳	۳۴۹	۱۵/۲
170℃-12h	۴۴۴	۳۲۲	۵/۶
170℃-16h	۴۴۸	۳۳۴	۶/۷
170℃-20h	۴۲۹	۳۱۸	۷/۱

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



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

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 می‌دهند. 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 نواحیHAZ و TMAZدر حین جوشکاری تجربه می کنند، رسوبات موجود داخل دانه‌ها در این نواحی حل و یا درشت می شود. این عوامل سبب می شود استحکام داخل دانه ها نسبت به مرزدانه‌ها 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 دانه‌ها تشکیل می‌شود. این موضوع موجب می‌شود استحکام داخل دانه‌ها نسبت به مرزدانه‌ها افزایش 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 سیکل۷۰۷۵ -T6 را که در نتایج آزمون کشش نیز بدست آمده بود، تایید می کند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

4- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری روی اتصال غیرمشابه آلیاژهای 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 TMAZ و HAZ می شود، بطوریکه این پدیده در سمت پسرو (آلیاژ ۷۰۷۵) بیشتر ملاحظه می شود. نتایج نشان داد عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر اساس سیکل۷۰۷۵ -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 TMAZ و HAZ درسمت پسرو رخ داد، در حالیکه پس از عملیات حرارتی از ناحیه اغتشاش شکست اتفاق می‌افتاد. در نمونه جوشکاری شده بیشتر سطح شکست درون دانه‌ای بود، در صورتی که پس از عملیات حرارتی سطوح شکست غالبا از نوع بین دانه ای دیده می شد.

منابع

۱- فتوحی ح، " اصلاح ریزساختار مقاطع جوش آلیاژ 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.

۲- بهرامی الف، " ارزیابی ریزساختار و رفتار تریبولوژیکی نانو کامپوزیت سطحی آلومینیوم - نیکل ایجاد شده بر سطح آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ با استفاده از فرایند 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.

۴- رفیعی ر؛ " اتصال غیرمشابه آلیاژهای 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-Aydın 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, "Retrogression 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-Aydın 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.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]