نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره2، پاییز و زمستان 1399، صفحه 160-145

ارزیابی رفتار خستگی آلیاژ ریختگی و فرآوری شده فوق ریزدانه آلیاژ Al-7075 با استفاده از فناوری اصطکاکی اغتشاشی

عبدالرسول سلطانی‌پور[1]، عبدالرضا سلطانی‌پور[2*]، خسرو فرمنش[3]

1- دانشگاه صنعتی مالک اشتر- دانشکده مهندسی مواد

2- دانشگاه صنعتی مالک اشتر- مجتمع دانشگاهی مکانیک

3- دانشگاه صنعتی مالک اشتر- مجتمع دانشگاهی هوا دریا

(دریافت مقاله: 1399/09/30 ؛ پذیرش مقاله: 1399/11/11)

چکیده

این مقاله نتایج تجربی ارزیابی‌های ساختاری و خواص مکانیکی بویژه خستگی ساختار فوق ریزدانه آلیاژ ریختگی Al-7075 که از طریق فرآوری اصطکاکی اغتشاشی اصلاح شده است را ارائه می‌نماید. ارزیابی ساختار به انضمام اندازه دانه آلیاژ ریختگی و مناطق مختلف فرآوری شده به ترتیب با استفاده از میکروسکوپ نوری والگوی پراش اشعه ایکس صورت گرفت. آزمایشات کشش تک محوره و خستگی خمشی بر روی هر دو شرایط ریختگی و پس از عملیات فرآوری در دمای محیط انجام گردید. خواص خستگی با دستگاه آزمایش کاملاً معکوس خمشی مورد ارزیابی قرار گرفت. خواص مکانیکی به واسطه حذف حفرات و توزیع یکنواخت ساختار فوق ریزدانه در سراسر زمینه بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. سطح شکست به‌منظور درک تغییر رفتار شکست از شبه شکست ورقه‌ورقه‌شدگی به شکست تورفتگی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. ساختار فوق ریزدانه منتج شده از عملیات فرآوری اصکاکی اغتشاشی به دلیل حذف عیوب ریختگی موجب افزایش قابل ملاحظه خواص کششی و خستگی شده است.

کلمات کلیدی: Al-7075 ریختگی، فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، تبلور مجدد سریع، ساختار فوق ریزدانه، سطوح شکست.

Evaluation of fatigue behavior of cast and ultra-fine processed Al-7075 by using friction stir technique

A. Soltanipour[1], A. Soltanipour[2*], K. Farmanesh[3]

1-Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

2-Faculity of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Iran

3-Faculty of Naval Aviation, Malek Ashtar Univesrsity of Technology, Iran

(Received 20 December 2020 ; Accepted 30 January 2020)

Abstract

This paper presents experimental results on the fatigue properties of the modified microstructure of cost Al-alloy 7075 via friction stir processing (FSP). The microstructural behavior was investigated by using optical microscope. The grain size of cast FSP-ed at different locations was investigated via x-ray diffraction analysis. Uniaxial tensile and bending fatigue tests were carried out at room temperature on both cast and after FSP conditions. Fatigue properties were

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: a.r.soltanipoor@gmail.com

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

investigated using a fully reversible bending testing machine. Significance enhancement of mechanical properties was attributes to the elimination of porosities as well as uniform distribution of ultra-fine grains throughout the matrix. A fractographic study was done to understand the fracture behavior being changed from quasi-cleavage fracture to dimple fracture. The resultant ultra-fine grain structure causes significant increasing in tensile and fatigue properties.

Keywords: Cast Al-7075, Friction stir processing, Rapid recrystallization, Ultra-fine grain structure, Fractography.

1- مقدمه

امروزه کاربرد آلیاژهای آلومینیوم ریختگی به واسطه کاهش وزن، قابلیت ساخت نزدیک به شکل نهایی نسبت به آلیاژهای آلومینیوم کار شده و قابلیت سادگی فرآوری بر روی آن‌ها در صنایع حمل و نقل به ویژه اتومبیل‌سازی و هوافضا افزایش یافته است [1 و2]. آلیاژهای فرآوری شده از استحکام تسلیم و نهایی بالا و همچنین چکش‌خواری مناسب برخوردار هستند. در هر نوع محصولات ریختگی، عیوبی همچون حفرات و فیلم‌های اکسیدی به انضمام ذرات ثانویه بر خواص مکانیکی به ویژه استحکام نهایی و عمر خستگی تأثیرات قابل ملاحظه‌ای دارند [3]. بهبود خواص کششی که از طریق مکانیزم‌های استحکام‌دهی محلول جامد، رسوبات و ریزدانگی ایجاد می‌شود، موجب افزایش خواص خستگی مواد می‌گردد [4 و5]. روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید به مانند اکستروژن تحت قالب زاویه‌دار، پیچش تحت فشار شدید، نورد تجمعی و آهنگری چند محوری تکنیک‌های مؤثری جهت دستیابی به ریزساختارهای فوق ریزدانه در قطعات حجیم هستند. جهت استفاده از آلیاژهای ریختگی در قطعات مکانیکی، اطمینان لازم در خصوص بازدهی خستگی آن‌ها، الزامی است. سازه‌های مهندسی در حین سرویس‌دهی تحت بارگذاری سیکلی قرار دارند. ترک‌ها می‌توانند از نواحی تمرکز تنش شروع شوند و تا مرحله شکست تحت بارهای سیکلی رشد نمایند. تغییرات در طراحی به گونه‌ای که بتوان تمرکز تنش را کاهش داد و همچنین اعمال تنش‌های باقی‌مانده فشاری جزء طریقه هایی هستند که در بهبود خواص خستگی از آن‌ها استفاده می‌شود [5]. فرآوری اصطکاکی اغتشاشی (FSP) فناوری جدیدی است که می‌تواند موجبات ریزدانگی و همگن‌سازی در بسیاری آلیاژهای تجاری به ویژه آلیاژهای سبک را فراهم سازد. در این فرآیند حالت جامد، ابزار چرخشی وارد حجم ورق می‌شود و باعث تغییر شکل پلاستیکی شدید ماده زمینه زیر ابزار غیر مصرفی می‌گردد که به اصلاح ریزساختاری منتج می‌گردد. بدیهی است که پالایش دانه در ناحیه جوش اصطکاکی اغتشاشی به واسطه تبلور مجدد دینامیکی رخ می‌دهد [2]. اساساً می‌توان فرآوری اصطکاکی اغتشاشی را به‌عنوان فناوری اصلاح سطحی در نظر گرفت. فرآوری FSP به برخی از آلیاژهای آلومینیوم ریختگی اعمال شده است و تغییر شکل پلاستیکی ناشی از این فناوری باعث حذف عیوب ریختگی شده است [2و6]. تاجیری و همکاران [2] اثر فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بر روی رفتار خستگی و بافت آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356-T6 بر روی نمونه‌های به ضخامت 5mm تحت شرایط نرخ کرنش کم (سرعت چرخش ابزار 500r.p.m) و نرخ کرنش زیاد (سرعت چرخش ابزار 1000r.p.m) را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که حضور عیوب بزرگ در آغاز مکان‌های شروع ترک باعث پایین بودن استحکام خستگی آلیاژ آلومینیوم ریختگی می‌گردند که می‌توان آن را به حاکم بودن مقاومت ضعیف‌تر شروع ترک نسبت داد. نتایج حاصل از این پژوهش اشاره به حذف عیوب ریختگی توسط فرآوری FSP و افزایش استحکام‌های خستگی نمونه‌های FSP شده نسبت به نمونه‌های ریختگی دارد. شوکلا و همکاران [5] وابستگی خواص خستگی آلیاژ Al-5024 فوق ریزدانه شده توسط فرآوری اصطکاکی اغتشاشی به اندازه دانه را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که FSP می‌تواند به عنوان مسیری مؤثر جهت دستیابی به ریزساختار فوق ریزدانه پایدار استفاده شود.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

جدول1- ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلز پرکننده (درصد وزنی)

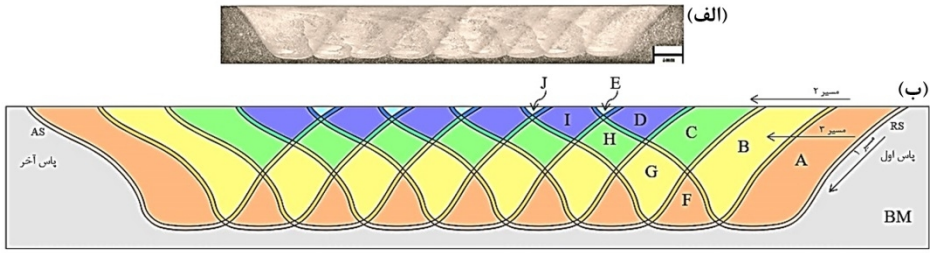
نام عنصر	Al	Zn	Mg	Cu	Si	Cr	Fe	Ti	Pb	Sn	Ni	Mn
درصد	Base	۵/۹۹	۲/۴۸	۲/۱	۰/۲	۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۰۳>	۰/۰۳>	۰/۰۳>	۰/۰۳>

در این پژوهش مشخص گردید که در سطوح تنش‌های مختلف، ریزساختارهای فوق ریزدانه‌تر از خواص خستگی بهتری برخوردار هستند. نی و همکاران [7] افزایش استحکام خستگی پر چرخه آلیاژ ریختگی Mg-9Al-1Zn فرآوری شده اصطکاکی اغتشاشی را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. هدف از این تحقیق درک مکانیزم افزایش خواص خستگی نمونه فرآوری شده AZ91 بوده است. فرآوری اصطکاکی اغتشاشی به واسطه قابلیت ایجاد ریزدانگی، حذف شبکه رسوب درشت دانه $Mg_{17}Al_{12}$، حذف حفرات ریختگی و رسوب ذرات ریز $Mg_{17}Al_{12}$ باعث افزایش قابل ملاحظه استحکام خستگی نمونه‌های فرآوری شده (95 MPa) نسبت به نمونه‌های ریختگی (45 MPa) شده است. کاپور و همکاران [3]، اثر فرآوری اصطکاکی اغتشاشی تک پاسه را بر روی خواص کششی و خستگی آلیاژ ریختگی آلومینیوم A206-T4 به ضخامت 8/6mm را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که فرآوری FSP موجب حذف حفرات، ریز شدن دانه‌ها، شکستن ذرات بین فلزی و کاهش اندازه آن‌ها می‌گردد و نهایتاً به بهبود استحکام نهایی کششی، چکش‌خواری، طول عمر کلی خستگی و زمان شروع ترک می‌گردد. جانا و همکاران [8] اثر نسبت تنشی (R=-1 و R=0) بر رفتار خستگی آلیاژ آلومینیوم ریختگی Al-7Si-0.6Mg فرآوری شده اصطکاکی اغتشاشی را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. در نسبت تنشی R=0، فرآوری FSP موجب افزایش 15 برابری طول عمر خستگی آلیاژ فوق الذکر نسبت به حالت ریختگی در سطوح تنشی مشابه شده است. این افزایش به تفاوت میزان محصور شدن ترک، بهبود چکش‌خواری و توزیع ذرات ریز شده Si نمونه‌های فرآوری شده در مقایسه با ریختگی نسبت داده شده است. نتایج پژوهش کوپر [9] نشان دهنده اثر معکوس عیوب ریختگی بر خواص خستگی آلیاژ ریختگی Al-Si-Mg است. عیوبی همچون حفرات بیشترین اثر مضر بر خواص خستگی را دارد.لی و همکاران [10] در پژوهش خود بر روی رفتار شکست خستگی آلیاژهای ریختگی Al-Si-Mg نتیجه گرفتند که افزایش چکش‌خواری زمینه موجب افزایش مقاومت به رشد ترک آلیاژ می‌شود. جانا و همکاران [1] اثر فرآوری اصطکاکی اغتشاشی چند پاسه را بر روی رفتار خستگی آلیاژ آلومینیوم ریختگی دقیق Al-7Si-0.6Mg به ضخامت تقریبی 3/3 mm مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که شروع ترک در آلیاژ ریختگی از حفرات بوده است، در حالی‌که در نمونه فرآوری شده سطح مشترک ذره و زمینه مسئولیت جوانه‌زنی ترک را داشته که به افزایش 5 برابری طول عمر خستگی آلیاژ فرآوری شده نسبت به ریختگی منتج شده است. سون سینور و همکاران [11] اثر تغییرات میزان حفره را بر روی استحکام خستگی آلیاژهای ریختگی آلومینیوم مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که همیشه افزایش میزان حفره موجب کاهش استحکام خستگی می‌گردد. کمبود اطلاعات در خصوص ارتباط خواص مکانیکی بویژه رفتار خستگی با تحول ساختاری ناشی از تبلور مجدد سریع حاصل از اعمال سیال خنک کننده در حین فرآوری FSP چند پاسه با همپوشانی 50% آلیاژ ریختگی Al-7075 موجب ارائه مقاله حاضر گردید. خواص خستگی ضعیف آلیاژ ریختگی Al-7075 که به طور وسیعی در سازه‌های هوایی کاربرد دارد به واسطه ساختار درشت ریختگی و عیوب ریختگی است. انتظار می‌رود این مشکل با پالایش ریزساختاری و همگن‌سازی از طریق فرآوری اصطکاکی اغتشاشی برطرف شود.

2- روش تحقیق

ترکیب شیمیایی ورق آلیاژ ریختگی Al-7075 که عملیات همگن‌سازی تحت دمای 474°C به مدت 2 ساعت و سپس کوئنچ در آب 25°C و عملیات پیرسازی مصنوعی تحت دمای 125 °C به مدت 20 ساعت بر روی آن صورت گرفته است، در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



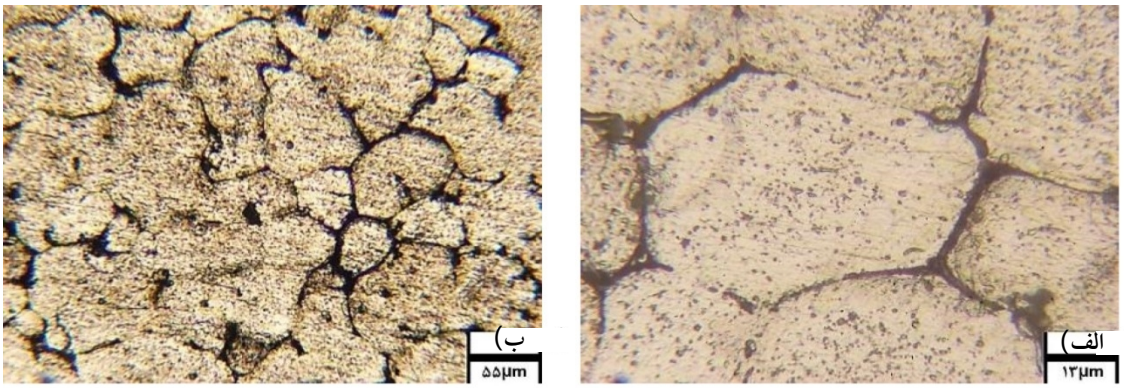
شکل 1- پیمایش 9 پاسه در جهت عمود بر مسیر ابزار با: 50% همپوشانی، اعمال محلول خنک کننده، سرعت چرخشی و پیشروی ابزار به ترتیب 180rpm و 16 mm/min الف) درشت نگار و ب) شماتیک.

جدول2- میزان فرآوری نواحی مختلف آلیاژ ریختگی Al-7075 توسط پاس های بعدی در همپوشانی 50%، سرعت چرخشی و پیشروی ابزار به ترتیب 180 rpmو 16 mm/min با اعمال محلول خنک کننده.

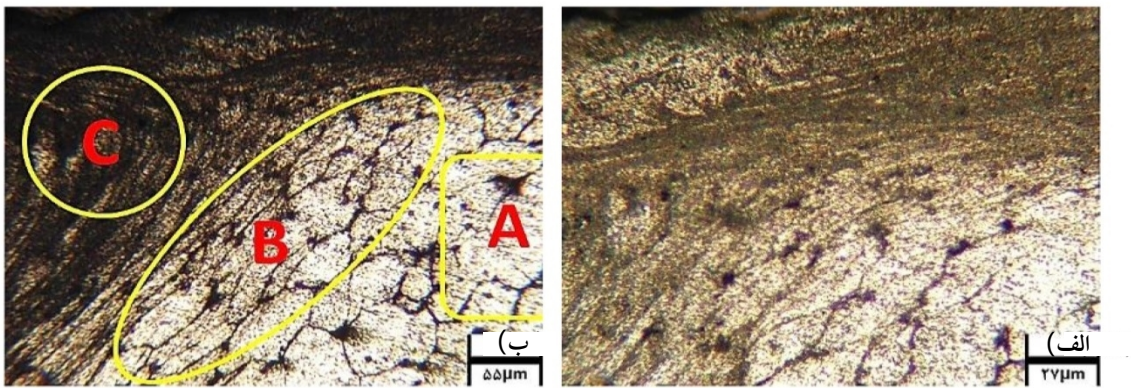
نواحی	فرآوری شده توسط پاس (های)	تعداد مراحل انجام شده	همپوشانی نسبت به سطح هر پاس (٪)
A	۱	۱	۴۳
B	۲ و ۱	۲	۳۲
C	۳، ۲ و ۱	۳	۱۶/۵
D	۴ و ۳، ۲، ۱	۴	۸
E	۵ و ۴، ۳، ۲، ۱	۵	۰/۵
F	۲	۱	۱۱
G	۳ و ۲	۲	۱۵/۵
H	۴ و ۳، ۲	۳	۸/۵
I	۵ و ۴، ۳، ۲	۴	۷/۵
J	۶ و ۵، ۴، ۳، ۲	۵	۰/۵

جدول (1) ارائه شده است. جهت حصول ساختار فوق ریزدانه و همچنین به منظور جلوگیری نمودن از رشد غیر عادی دانه ها، عملیات فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق همگن‌سازی شده در ابعاد 300mm×150×12با اعمال محلول خنک‌کننده ترکیبی آب، متانول، یخ خشک و مایع نیتروژن با دمای 15°C- بلافاصله در پشت ابزار و به‌صورت گردشی در ورق پشت‌بند مسی جهت سریع سرد نمودن مواد فرآوری شده صورت گرفت. فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در سرعت چرخشی 180r.p.m، سرعت پیشروی 16mm/min، زاویه انحراف ابزار 2° و عمق فروروی شانه ابزار به میزان 0/2mm با همپوشانی 50% بر روی ورق ریختگی همگن‌سازی شده به ضخامت 12 mm انجام گردید. این همپوشانی براساس انتقال عرضی مرکز پین به میزان 50% اندازه قاعده مخروط ناقص پین که برابر با 7 mm می‌باشد، صورت گرفت. به‌منظور بررسی حذف حفرات ریختگی، ورق‌های آلیاژ آلومینیوم ریختگی قبل و بعد از عملیات فرآوری اصطکاکی اغتشاشی مورد آزمایش غیر مخرب رادیوگرافی (اشعه X) قرار گرفتند. نوارهای مختلف عرضی عمود بر مسیر فرآوری شده برش داده شدند و سپس عملیات ماشینکاری و پولیش بر روی آنها صورت گرفت. جهت بررسی‌های ساختاری نمونه‌های پولیش شده با 20% حجمی از محلول ترکیبی HF به میزان 3mL، HCL به میزان9mLو HNO_3 به میزان 6mLوآب مقطر به میزان150mL

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل 2- ساختار فلز پایه آلیاژ آلومینیوم ریختگی عملیات حرارتی شده در بزرگنمایی‌های مختلف: الف) 50x، ب) 200x.



شکل 3- ناحیه انتقال ریزساختاری ورق آلیاژ آلومینیوم ریختگی به ناحیه اغتشاش فرآوری FSP در سطح ورق در بزرگنمایی‌های مختلف: الف) 50x، ب) 100x، A: فلز پایه آلیاژ آلومینیوم ریختگی، B) ناحیه انتقال، C) ناحیه اغتشاش.

9mL و HNO_3 به میزان 6 mL و آب مقطر به میزان150 mL و 80% حجمی متانول در مدت زمان متوسط 10 دقیقه تحت اعمال یک ولت الکترواچ شدند.

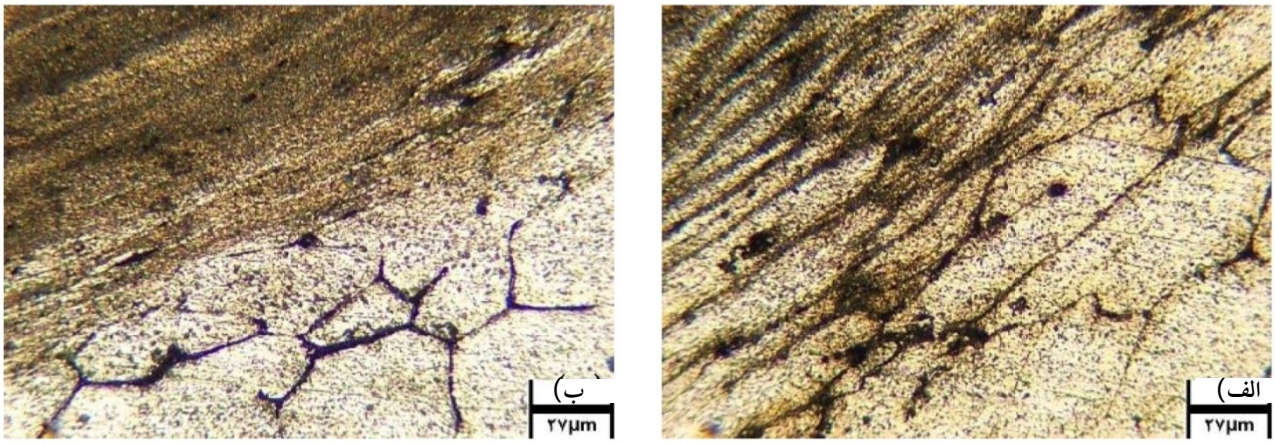
به منظور بررسی رفتار سیلان ماده و ساختار فوق ریزدانه ورق آلیاژ ریختگی آلومینیوم فرآوری شده، از میکروسکوپ نوری (OM) استفاده شد. محاسبه میانگین اندازه دانه نمونه بعد از عملیات فرآوری، توسط آزمون پرتو اشعه ایکس بر مبنای زوایای 5 تا 120 درجه، در مدت زمان دو ساعت انجام گردید. آزمون‌های کشش و خستگی کاملاً معکوس خمشی به ترتیب جهت بررسی خواص کششی و رفتار خستگی نمونه‌های ریختگی و نمونه‌های مقطع عرضی فرآوری شده صورت گرفت. بواسطه اینکه از یک طرف حداقل پراکندگی در آزمایشات خستگی با دستگاه‌های چرخشی- خمشی می‌باشد و از طرف دیگر معمولاً جهت بررسی تأثیر متغیرهای متالورژیکی، بر بازدهی خستگی، از نمونه‌های صاف و پولیش شده تحت شرایط تنشی معکوس استفاده می‌گردد [12]، لذا در این بررسی از دستگاه چرخشی- خمشی با اعمال بارگذاری چهار نقطه‌ای استفاده شد. آزمایشات خستگی براساس استاندارد ISO 1143 بر روی نمونه‌های پالیش شده با کمترین قطر مقطع برابر با 3mm تحت تنش کاملاً معکوس (R=1)، فرکانس 60Hz و تنش‌های اعمالی متفاوت انجام گردید. به‌منظور درک تغییر رفتار شکست، سطوح شکست نمونه‌های کشش و خستگی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند.

3- نتایج و بحث

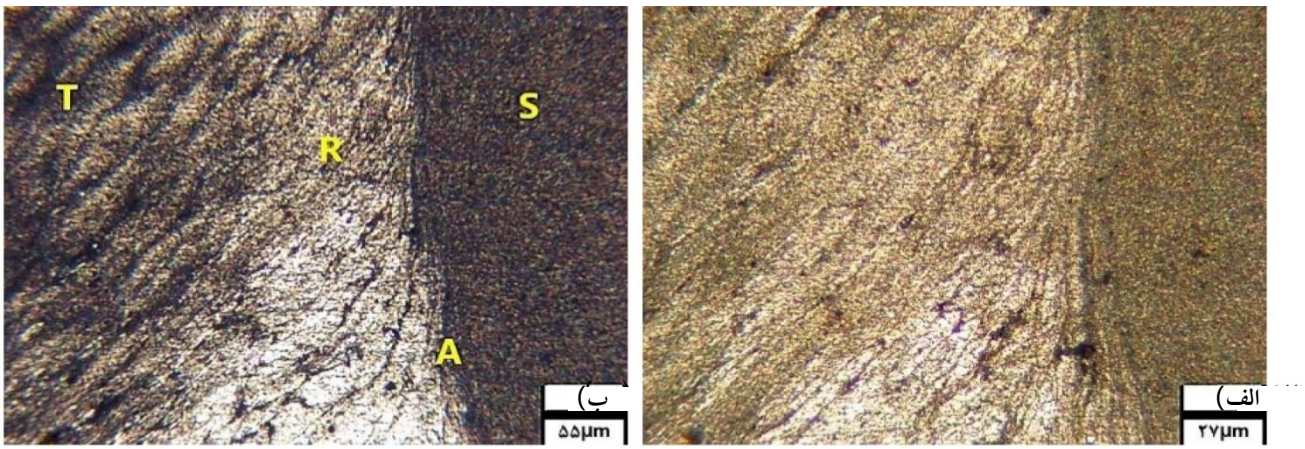
3-1- بررسی تحول ساختاری

درشت نگار فرآوری اصطکاکی اغتشاشی پیمایش 9 پاسه با 50% همپوشانی با اعمال سیستم خنک‌کنندگی که بر روی ورق ریختگی آلیاژ آلومینیوم 7075 تا عمق 9/5 mm انجام شده است،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل 4- ناحیه انتقال ریزساختاری ورق آلیاژ آلومینیوم ریختگی به ناحیه اغتشاش فرآوری FSP در قسمت‌های میانی و انحنای کف قسمت پسرو پاس اول در بزرگنمایی 100x، الف) میانی ورق، ب) انحنای کف قسمت پسرو.

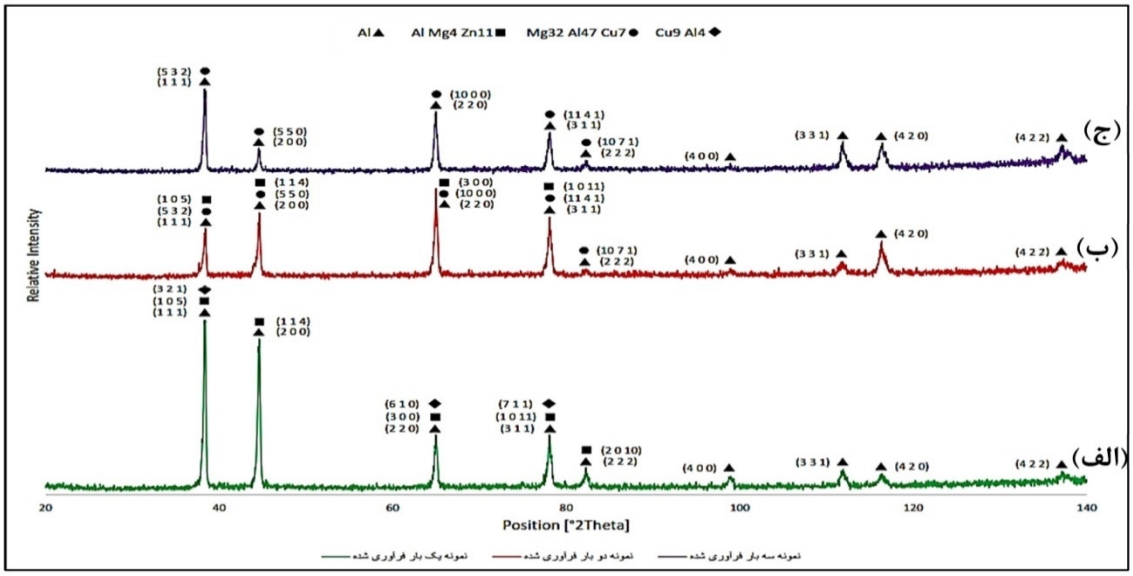


شکل 5- فصل مشترک ریزساختاری پاس‌های اول و دوم ورق آلیاژ آلومینیوم ریختگی فرآوری شده FSP.
در بزرگنمایی‌های مختلف: الف) 50x، ب) 100x.

به انضمام شماتیک آن در شکل (1) نشان داده شده است. همانطور که در درشت‌نگار شکل (1) نشان داده شده است، اطراف سطح فرآوری شده در برگیرنده طرف پیشرو و پسرو می‌باشد. نزدیک به سطح بالایی ورق، ناحیه اغتشاش پهن است که به واسطه تغییر شکل زیاد و گرمای اصطکاکی حاصل از تماس سطح ورق با شانه ابزار در حین فرآوری اصطکاکی است. عدم حضور عیوب در ناحیه اغتشاش، دلالت بر این دارد که با توجه به پارامترهای اعمال شده، گرمای ورودی یا زمان لازم در دمای بالا به میزان کافی بوده است تا دمای ماده به صورت موضعی به گونه‌ای افزایش یابد که قابلیت ایجاد تغییر شکل پلاستیکی جهت جریان مواد در اطراف پین به طور کامل فراهم گردد [13و14].

میزان فرآوری نواحی مختلف توسط پاس‌های بعدی را می‌توان در جدول (2) مشاهده نمود. خصوصیات فرآوری سایر مناطق مشابه نواحی J, I, H, G, F می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد، هر پاس طرف پیشرو ناحیه اغتشاش، پاس قبلی را همپوشانی می‌کند. بدین معنی که وقتی ابزار به‌صورت عرضی به سمت طرف پیشرو انتقال می‌یابد، بخشی از مواد که قبلاً فرآوری شده است، در حین پاس‌های بعدی، تحت فرآوری اضافی قرار می‌گیرند. این مشاهدات تأیید کننده نظرات جونس و همکاران [15] نیز می‌باشد. ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ریختگی عملیات حرارتی شده 7075 که به‌عنوان فلز پایه در این تحقیق استفاده شده است را می‌توان در شکل (2) بزرگنمایی‌های مختلف مشاهده نمود.

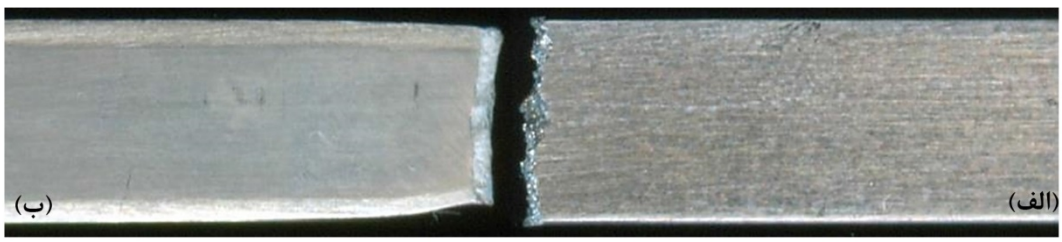
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل 6- الگوی پراش پرتو اشعه X برای مناطق یکبار ، دو بار و سه بار فرآوری شده اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ AL-7075 ریختگی:
الف) یکبار فرآوری شده، ب) دو بار فرآوری شده و ج) سه بار فرآوری شده.

جدول 3- خواص کششی مقطع عرضی آلیاژ AL7075 ریختگی و فرآوری شده توسط FSP.

مشخصه	σ_Y (20%) (MPa)	$\sigma_{U.T.S}$ (MPa)	σ_F (MPa)	E (%)
ریختگی BM	۱۰۳	۲۴۱	۲۴۱	۲/۳
فرآوری شده FSP-ed	۳۱۸	۳۸۰	۳۰۹	۵/۴



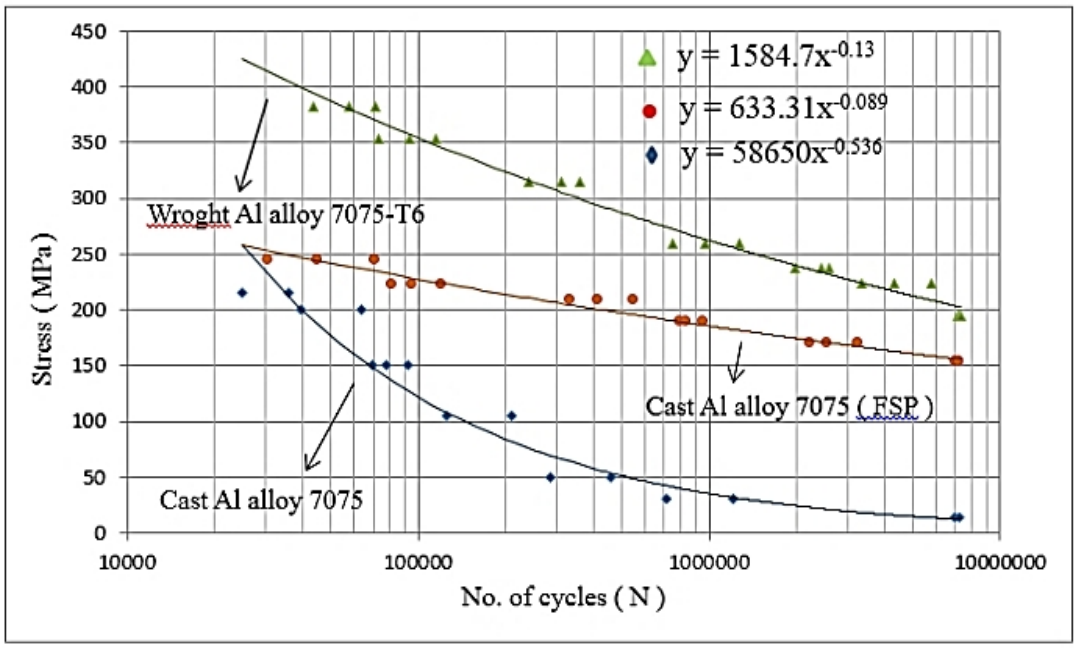
شکل 7- ظاهر شکست نمونه‌های آزمون کشش، الف) آلیاژ آلومینیوم ریختگی 7075 عملیات حرارتی شده و ب) فرآوری شده 50% همپوشانی FSP.

میانگین اندازه دانه‌ها در حدود 60 µm می‌باشد. همچنین می‌توان رسوباتی را در زمینه آلیاژ آلومینیوم ریختگی عملیات حرارتی شده، مشاهده نمود.

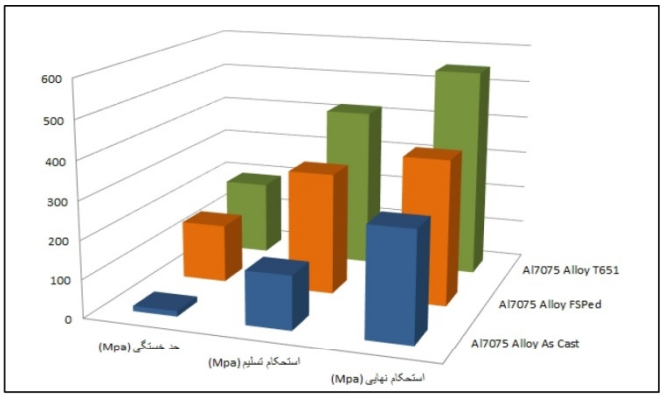
در بررسی‌های ریزساختاری آلیاژ آلومینیوم ریختگی فرآوری شده، تفاوت قابل ملاحظه مرزی بین فلز پایه و پاس‌های مختلف همپوشانی شده یافت نشد، بدین معنی که مناطق متأثر از عملیات ترمومکانیکی و متأثر از حرارت در هیچ یک از نواحی ورق آلیاژ آلومینیوم ریختگی فرآوری شده قابل تشخیص نبودند که می‌تواند براساس نظریه سو و همکاران [16] به واسطه دو امکان ذیل باشد:

- ساختارهای فوق ریزدانه بدست آمده در حین سیکل‌های حرارتی ایجاد شده به وسیله پاس بعدی، دارای پایداری عالی هستند. به علاوه به واسطه نرخ سریع سرد شدن، سیکل‌های حرارتی اضافی برای مدت زمان کوتاهی از بین می‌روند و به دماهای حداکثری پایین تری می‌رسند و موجب می‌گردند تا زمان برای دمایی که بتواند ساختارهای فوق ریزدانه فرآوری شده قبلی را متأثر گرداند، کافی نباشد.
- به واسطه سریع سرد کردن، مناطق متأثر از عملیات

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل8- مقایسه رفتار خستگی آلیاژهای Al-7075 ریختگی، ریختگی فرآوری شده FSP و کار شده T6.

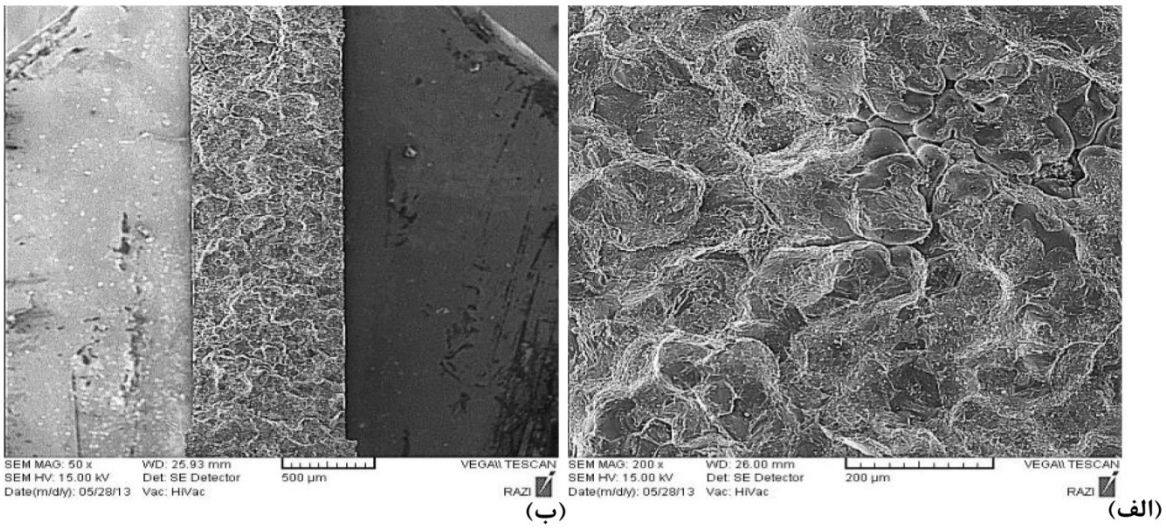


	استحکام خستگی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	نسبت حد خستگی (استحکام نهایی / استحکام خستگی)
Al7075 Alloy As Cast	14	140	285	0.0491
Al7075 Alloy FSPed	153	318	380	0.4026
Al7075 Alloy T6	195	421	550	0.3545

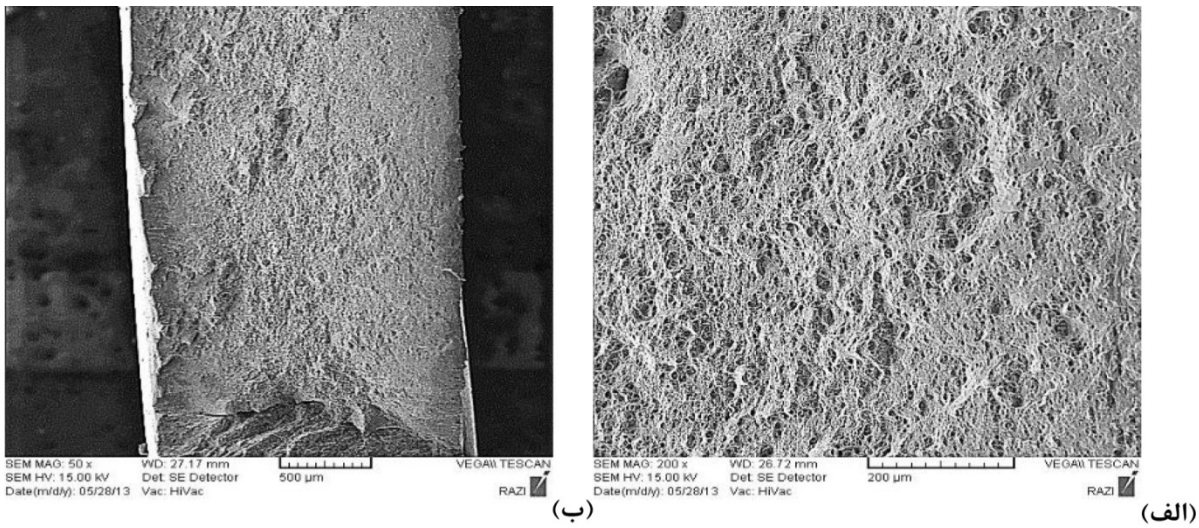
شکل9- خواص خستگی و کششی آلیاژهای Al-7075 ریختگی، فرآوری شده (FRP) و کار شده T6.

ترمومکانیکی و متأثر از حرارت به قدری کوچک شوند که قابل تشخیص نباشند و موجب شوند تا مناطق مرزی مشخص در نواحی انتقال آشکار نگردد. بنابراین با توجه به اینکه در این تحقیق از محلول خنک‌کننده استفاده شده است، نواحی متأثر از عملیات ترمومکانیکی و متأثر از حرارت، قابل تشخیص نبوده و در تصایر ریزساختاری به عنوان ناحیه انتقال در نظر گرفته شده اند. ساختار ناحیه انتقالی بین فلز پایه آلیاژ آلومینیوم ریختگی عملیات حرارتی شده و منطقه اغتشاش پاس اول در سطح منطقه فرآوری شده در شکل (3) نشان داده شده است. در منطقه A در سمت راست شکل (3)، ریزساختار آلیاژ

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل10- ماکروگراف‌های SEM سطح شکست آزمایش کشش عرضی نمونه ریختگی آلیاژ آلومینیوم 7075،
الف) عدم حضور لبه های برشی و ب) حضور چاک‌های تیره (حفرات انقباضی).



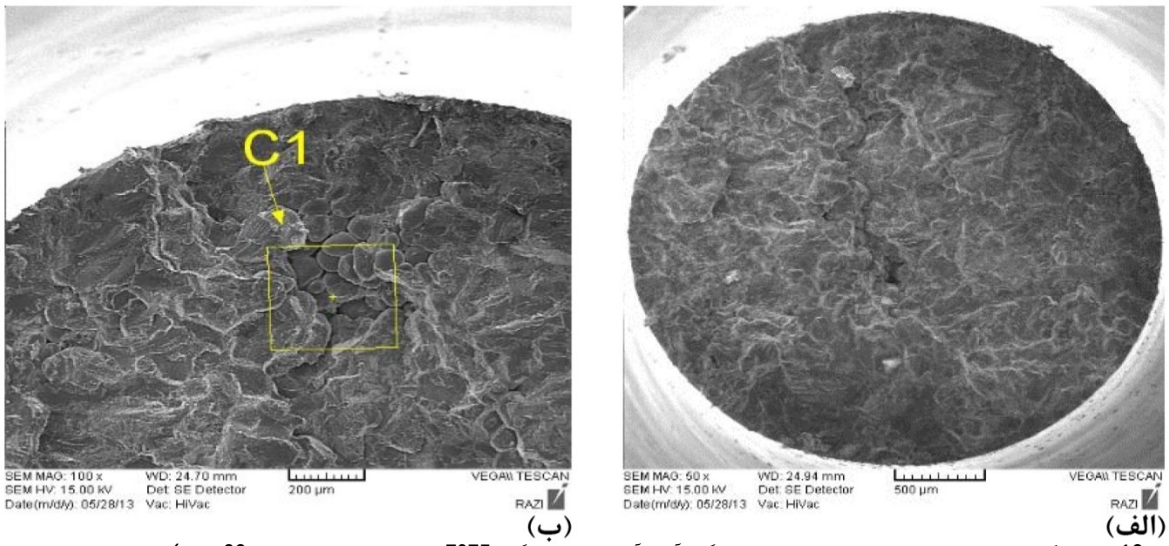
شکل 11- ماکروگراف SEM نمونه کشش عرضی آلیاژ ریختگی 7075 قرآوری شده اغتشاشی اصطکاکی، الف) حضور لبه های برشی، ب) حضور تورفتگی‌های نسبتا کوچک.

ریختگی عملیات حرارتی شده Al-7075 که دارای دانه‌های درشت ریختگی می‌باشد را می‌توان مشاهده نمود.

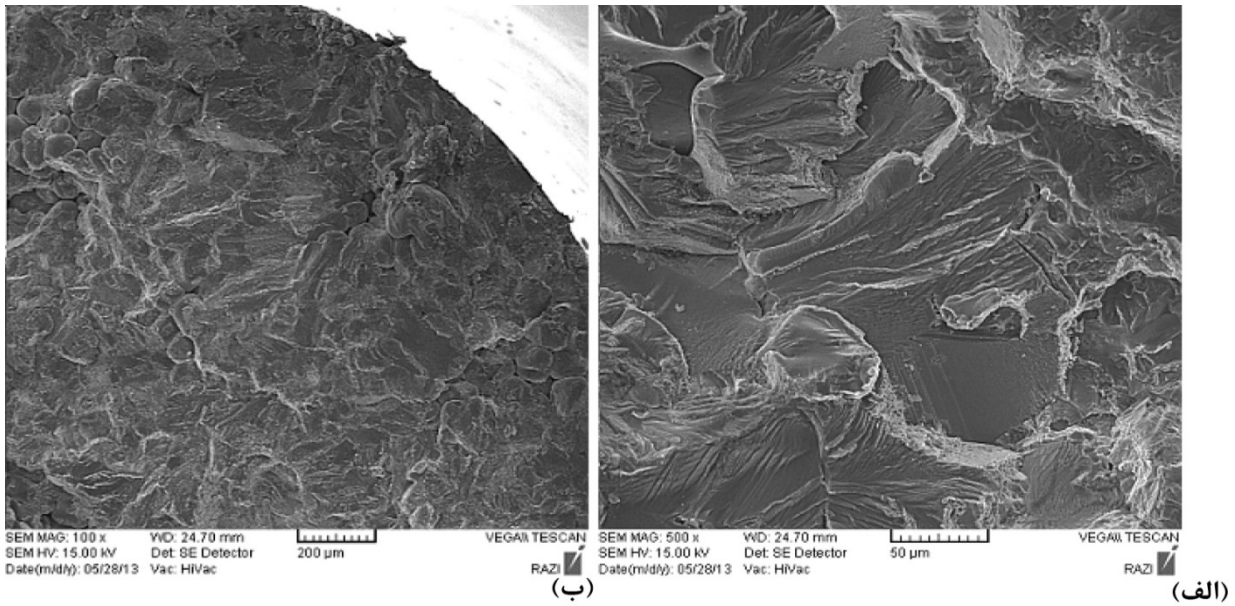
در منطقه C سمت چپ همین شکل ناحیه اغتشاش که متشکل از نوارهای کشیده شده ناشی از چرخش سیلان ماده در اطراف پین می‌باشد نشان داده شده است. این ناحیه (C) تغییر شکل پلاستیکی شدید و دمای بالای ناشی از اصطکاک را تجربه نموده است که به موجب آن‌ها پالایش دانه و تبلور مجدد دینامیکی در این منطقه رخ داده است و منجر به ریز شدن دانه‌ها در این ناحیه گردیده است.

ریزساختار منطقه B که به عنوان ناحیه انتقال شناخته می‌شود را نیز می توان فی بین نواحی فلز پایه (منطقه A) و ناحیه اغتشاشی (منطقه C) مشاهده نمود. این ناحیه (B) هم دما و هم تغییر شکل را در حین فرآوری FSP تجربه کرده است. ناحیه انتقال (منطقه B) دستخوش تغییر شکل پلاستیکی شدید شده است، ولیکن به واسطه اینکه گرمای اصطکاکی در این منطقه به اندازه کافی نبوده است، ساختار ریزدانه و تبلور مجدد یافته به مانند منطقه C، ایجاد نشده است. ریزساختارهای ناحیه انتقال در قسمت های میانی و انحنای کف قسمت پسرو پاس اول

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل 12- ماکروگراف‌های SEM سطح شکست نمونه خستگی آلیاژ آلومینیوم ریختگی 7075 تحت تنش اعمالی 22MPa، الف) نمای کلی سطح شکست و ب) قبه های گرد مرتبط با حفره انقباضی.



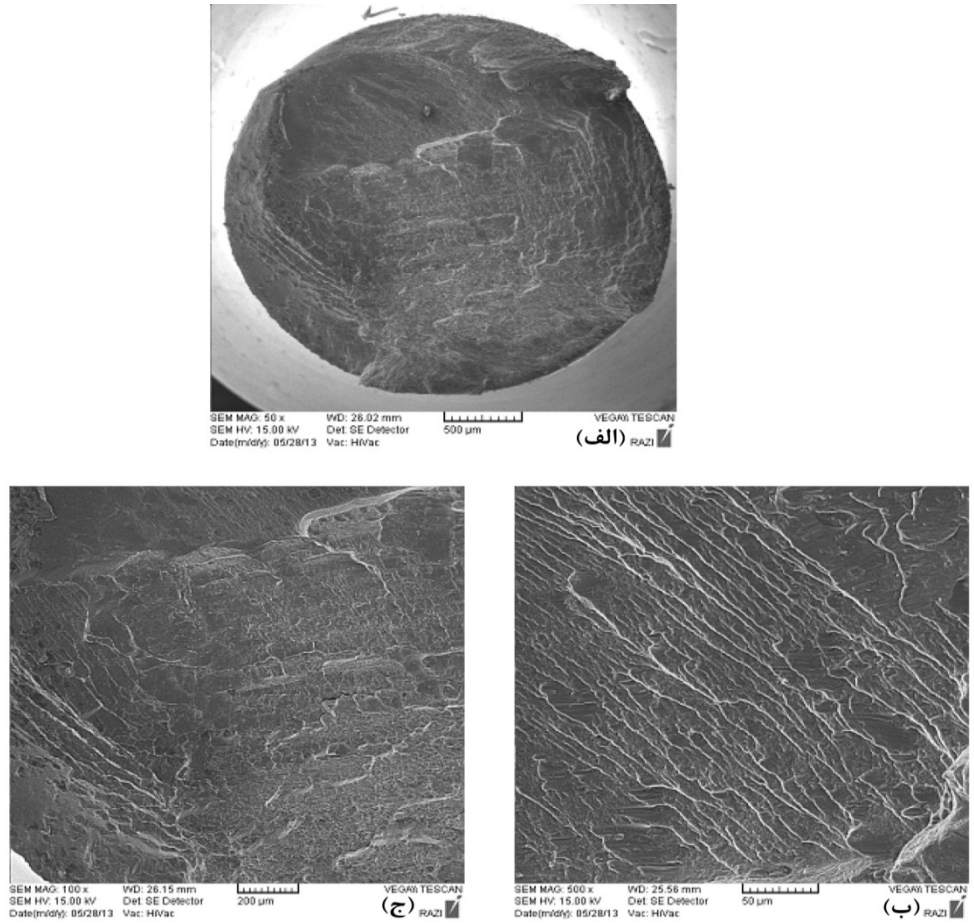
شکل 13- ماکروگراف‌های SEM سطح شکست نمونه خستگی آلیاژ آلومینیوم ریختگی 7075 تحت تنش اعمالی 22MPa، الف) محل‌های جوانه‌زنی ترک خستگی در دندریت انقباضی و ب) پخ‌ها با تیغه‌های دارای شاخه‌های متعدد.

ورق فرآوری شده در شکل (4) نشان داده شده است.

با در نظر گرفتن نتایج ساتو و همکاران [17]، عدم تشکیل دانه‌های ریز در این منطقه می تواند بواسطه کم بودن کرنش نسبت به ناحیه مرکزی منطقه اغتشاش باشد که به تبلور مجدد در ناحیه انتقالی منتج نمی شود.

شکل (5) ریزساختار فصل مشترک پاس اول و پاس همپوشانی دوم را در موقعیت 9 mm از سطح نشان می دهد. مناطق همزنی پاس اول، ناحیه انتقال سمت پسرو پاس اول و ناحیه انتقال پسرو پاس دوم به ترتیب در شکل (5- الف) به صورت نواحی R, A, S مشخص شده اند. ناحیه فرآوری شده پاس اول که توسط پاس دوم مجدداً تحت فرآوری قرار گرفته است را می‌توان در قسمت T که در سمت چپ بالای شکل (5- الف) می باشد، مشاهده نمود. اثرات چرخش پین در سیلان ماده اطراف پین به صورت باندهای ساختاری کشیده شده در منطقه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل14- ماکروگراف SEM سطح شکست نمونه خستگی آلیاژ آلومینیوم ریختگی فرآوری شده FSP تحت تنش اعمالی 170MPa
الف) حضور علائم چرخ‌دنده‌ای (منطقه رشد ترک) در موقعیت‌های ساعت 4 و 10، ب) حضور خطوط توقفی مرتبط با دوره‌های رشد ترک و ج) انحراف مسیر رشد ترک در ناحیه بارگذاری زیاد.

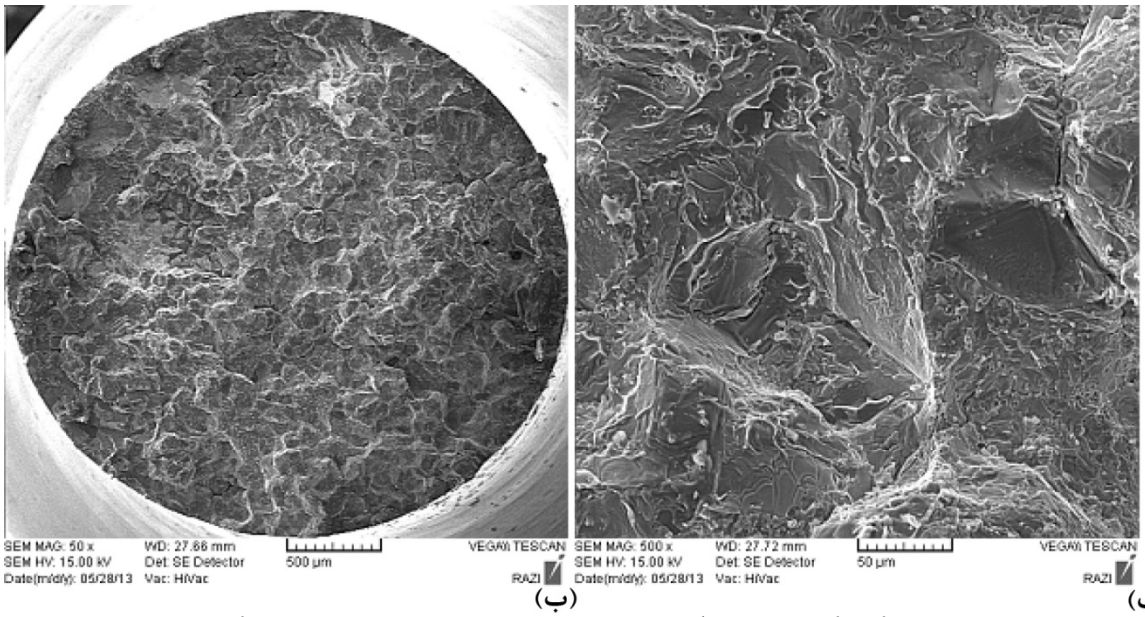
T نشان داده شده است. عدم توزیع یکنواخت ریزساختارهای فرآوری شده نیز مشاهده می گردد.

3-2- الگوی پراش اشعه X

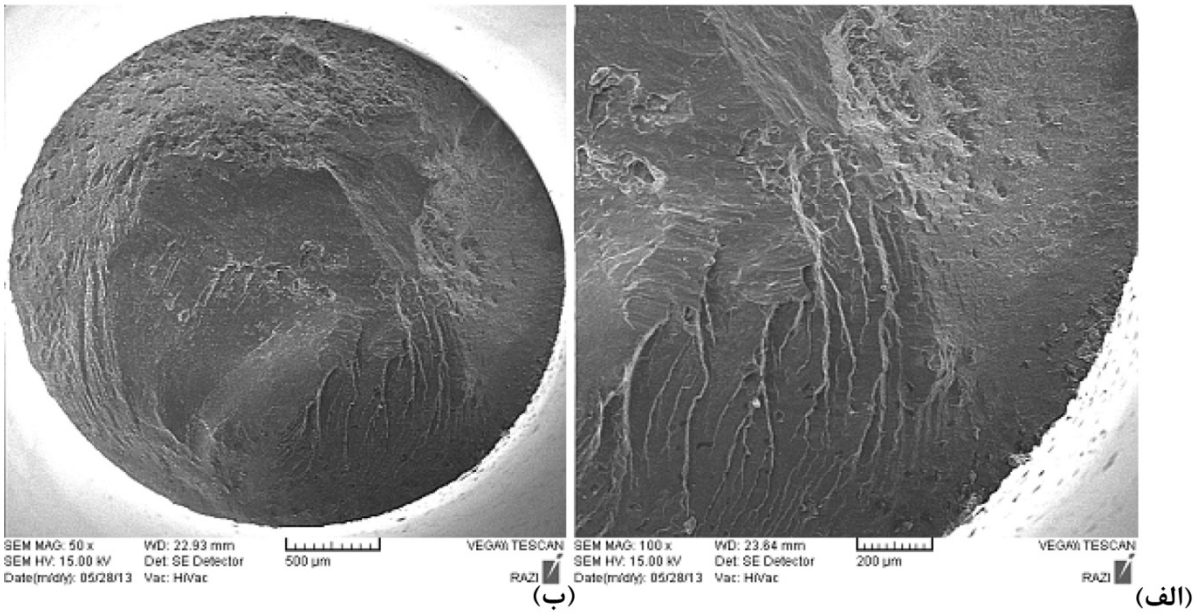
الگوی پراش پرتو اشعه X برای مناطق یکبار، دو بار و سه بار فرآوری شده اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ریختگی 7075 در شکل (6) نشان داده شده است. اندازه های دانه استخراج شده از آنالیز فوق (ویلیام سون هال) برای مناطق یکبار، دو بار و سه بار فرآوری شده به ترتیب برابر با، 74nm، 38 nm و 31nm است که تأیید کننده ایجاد ساختار فوق ریزدانه در ورق آلیاژ آلومینیوم ریختگی فرآوری شده توسط FSP است.

انجام عملیات فرآوری FSP با کمترین سرعت چرخش ابزار (180rpm) به انضمام نرخ سرد شدن بالا موجب گدید تا ماده‌ای که به طور کامل درآمیخته و فرآوری شده است، زمان خیلی کوتاهی را در دمای بالا تجربه نماید و باعث شود تا علاوه بر اینکه دانه‌های ریز ناشی از تبلور مجدد سریع در منطقه اغتشاش شکل بگیرند، از رشد دانه ها نیز جلوگیری شود و ساختار فوق ریزدانه در این منطقه، باقی بماند. نتایج حاصله در این پژوهش در خصوص تشکیل ساختار فوق ریزدانه در دمای نسبتاً کم و عدم توزیع یکنواخت ریزساختارهای فرآوری شده در ناحیه اغتشاش به ترتیب تأیید کننده نظرات وون [14] و سو [16] می باشد. از طرفی با در نظر گرفتن نظرات سایر محققین [13 و 14] می توان انتظار داشت که با توجه به اعمال محلول خنک کننده در پشت و زیر ابزار، ناحیه فرآوری شده در این تحقیق، نیز می تواند تحت تبلور مجدد دینامیکی مستمر قرار گرفته باشد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل 15- ماکروگراف سطح شکست (SEM) نمونه خستگی آلیاژ Al-7075 ریختگی تحت تنش اعمالی 238MPa: الف) سطح ناهموار با حفرات و ترک‌ها، ب) صفحات شبه تورقی.



شکل 16- ماکروگراف سطح شکست (SEM) خستگی آلیاژ Al-7075 ریختگی فرآوری شده (FSP) تحت تنش اعمالی 238MPa
الف) سطح نسبتاً صاف عاری از حفرات و ریز ترک‌ها و ب) ایجاد انشعاب‌های شاخه‌ای بواسطه افزایش میزان بارگذاری.

3-3- خواص مکانیکی

3-3-1- خواص کششی

خواص کششی نمونه های آلیاژ Al-7075 ریختگی و فرآوری شده اصطکاکی اغتشاشی در مقطع عرضی (مقطع عمود بر جهت فرآوری) در جدول (3) نشان داده شده است. در مقایسه مقطع فرآوری شده با نمونه ریختگی، نمونه فرآوری اصطکاکی اغتشاشی شده افزایش قابل ملاحظه در تنش تسلیم، استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول را نشان می دهد. استحکام تسلیم به میزان تقریبی 300%، استحکام نهایی به میزان 158% و ازدیاد طول به میزان 235% نسبت به نمونه ریختگی عملیات حرارتی‌شده افزایش یافته است. شکل (7) ظاهر نمونه های شکسته‌شده آزمایش کشش را برای آلیاژ آلومینیوم ریختگی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

عملیات حرارتی شده و آلیاژ آلومینیوم ریختگی فرآوری شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد برای آلیاژ آلومینیوم ریختگی عملیات حرارتی شده گلویی شدن رخ نداده است، در صورتی که برای نمونه فرآوری اصطکاکی اغتشاشی شده گلویی شدن به طور واضح مشخص است که نشان دهنده بهبود رفتار مومسان خوب آن می باشد.

با در نظر گرفتن نتایج آزمایشات غیر مخرب رادیوگرافی و ریزساختاری آلیاژ آلومینیوم ریختگی و فرآوری شده، افزایش قابل ملاحظه در خواص کششی می تواند به دلیل حذف حفرات ناشی از ریختگی و همگن سازی ریزساختاری توسط فرآوری اصطکاکی اغتشاشی همپوشانی باشد. بنابراین براساس رابطه هال- پچ مبنی بر افزایش استحکام تسلیم با کاهش اندازه دانه می‌توان از طریق فرآوری اصطکاکی اغتشاشی موجبات پالایش ریزساختاری و افزایش خواص مکانیکی به ویژه کششی را فراهم نمود. این نتایج نظرات ما و همکاران [18] را نیز تأیید می کند.

3-3-2- خواص خستگی

استحکام خستگی آلیاژهای آلومینیوم ریختگی و فرآوری شده اصطکاکی اغتشاشی 7075 به انضمام کار شده 7075-T6 نسبت به زمان و نسبت به خواص کششی در اشکال (8 و 9) ارائه شده است. استحکام های خستگی در زمان طول عمر 10^7 سیکل برای آلیاژهای آلومینیوم ریختگی، ریختگی فرآوری شده و کار شده به ترتیب برابر با 14MPa، 153MPa و 195MPa می باشد و نسبت خستگی (استحکام خستگی به استحکام کششی) آلیاژهای فوق به ترتیب برابر با 0/0491، 0/4026 و 0/3545 است.

استحکام خستگی و نسبت حد خستگی آلیاژ آلومینیوم ریختگی 7075 فرآوری شده نسبت به آلیاژ ریختگی 7075 به ترتیب به میزان تقریبی 10/92 برابر و 8/19 برابر افزایش یافته است. این افزایش قابل ملاحظه می تواند بواسطه فاکتورهایی همچون:

1) ایجاد شدن ساختار فوق ریزدانه ناشی از تغییر شکل پلاستیکی شدید همراه با تبلور مجدد سریع که از مکانیزم بازیابی فرآیند ترمومکانیکال آلیاژ ریختگی Al-7075 منتج شده است، باشد،

2) حذف حفرات آلیاژ آلومینیوم ریختگی و همگن‌سازی ریزساختار همراه با ایجاد ساختار دانه‌های هم‌محور باعث شده است تا انرژی پلاستیکی بصورت یکنواخت در درون ورق فرآوری شده توزیع شود و از بوجود آمدن مکان های تمرکز تنش در درون ماده جلوگیری کند،

3) با در نظر گرفتن این نکته که بیشتر طول عمر خستگی صرف شروع ترک می شود، لذا فوق ریزدانگی می تواند باعث شود تا علاوه بر اینکه زمان بیشتری صرف شروع ترک در پشت مرز دانه ها شود، انباشتگی نابجایی‌ها در پشت مرز دانه ها نیز افزایش یابد و موجب افزایش استحکام خستگی گردد. بنابراین می توان انتظار داشت که با انجام عملیات FSP بر روی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم ریختگی، موجبات افزایش خواص کششی و خستگی این آلیاژ فراهم شود.

براساس نظریه ما و همکاران [18]، مبنی بر اینکه ساختار فرآوری شده ریزدانه دارای تنش تسلیم فشاری بالاتری نسبت به نمونه ریختگی است، مقاومت اینگونه ساختارها در برابر شروع ترک خستگی افزایش می¬یابد. نتایج حاصله از این پژوهش مبنی بر افزایش قابل ملاحظه خواص خستگی نمونه ریختگی فرآوری شده در تطابق با نتایج مرجع فوق¬الذکر است.

3-4- بررسی سطوح شکست

3-4-1- نمونه های کشش

مقاطع سطح شکست نمونه های کشش عرضی آلیاژ Al-7075 ریختگی و فرآوری شده اصطکاکی اغتشاشی، در شکل (10) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (10-الف) مشاهده می گردد، عدم حضور لبه های برشی در کناره های سطح شکست نمونه ریختگی، نشان دهنده فقدان داکتیلیته در آلیاژ آلومینیوم ریختگی می باشد. شکل (10-ب) حفرات متعددی که به چاک های تیره شباهت دارند را نشان می دهد. این چاک ها نشان دهنده توزیع حفرات انقباضی در نمونه ریختگی هستند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

ناحیه حفره انقباضی محتوی قسمت های پهن و گرد دندریت می باشد.سطح شکست نمونه کشش عرضی نمونه های فرآوری شده در شکل (11) نشان داده شده است. حضور لبه های برشی در کناره های سطح شکست و همچنین حضور علائمی مشابه با تورفتگی های نسبتاً کوچک دلالت بر رفتار نرم نمونه فرآوری شده دارد.

3-4-2-نمونه های خستگی

تصویر کلی سطح شکست نمونه خستگی آلیاژ آلومینیوم ریختگی 7075 تحت تنش اعمالی 22 MPa با طول عمر 2/500/000 سیکل که دارای حفرات انقباضی می باشد، در شکل (12- الف) نشان داده شده است. قبه های گرد درون مستطیل شکل (12-ب) مرتبط با حفره انقباضی می باشند که نشان دهنده بازوهای دندریتی ثانویه نیز هستند. سطح شکست با شبکه دندریتی که دارای حفرات انقباضی است، پر شده است. این شبکه قابلیت مقاومت در برابر رشد ترک خستگی تحت تنش اعمالی 22 MPa را نداشته و موجب گردیده تا تحت این تنش، نمونه خستگی پس از گذراندن 2/500/000 سیکل شکسته شود. حفرات انقباضی به عنوان انفصال های متعارف قطعات ریختگی شناخته می شوند و محل آغاز ترک نیز محسوب می شوند. شکل (13-الف) محل های جوانه زنی ترک در دندریت انقباضی را نشان می دهد. در این شکل دندریت ها در درون حفره انقباضی نمایان هستند. در شکل (13-ب) پخ‌هایی مشاهده می گردد که تیغ های آن‌ها دارای شاخه های متعددی هستند که نمایانگر رفتار شکست ترد خستگی می‌باشند.سطح شکست ناهموار همراه با سطوح ورقه ورقه شدگی به وضوح مشخص می باشد. برخی ترک ها و حفرات ریختگی که منابع آغاز ترک خستگی هستند، به طور واضح قابل رؤیت هستند. عیوب ریختگی همچون حفرات مکان های مناسب برای آغاز و رشد ترک هستند. مسیر ترک عموماً ناهموار و ناصاف است که ترک مسیر عیوب را دنبال می‌کند.

همانطور که در شکل (14) مشاهده می گردد، بواسطه انجام آزمایش خستگی انجام شده یعنی خمش معکوس سیکلی، ترک‌ها در موقعیت های مختلفی که در دو طرف نمونه قرار دارند، شروع شده اند، زیرا در این موقعیت ها در حین خمش معکوس سیکلی، بیشترین تنش های کششی شکل گرفته اند. در شکل (14-الف) در موقعیت های ساعت 4 و 10 علائم چرخ‌دنده‌ای که حاکی از منطقه شروع ترک می باشد مشاهده می‌گردد. در حین آزمایش خمش معکوس سیکلی، بیشترین تنش های کششی در این موقعیت ها شکل گرفته است. مرکز تصویر شکل (14-الف) که نسبت به نواحی دیگر، ناهموارتر است نشان دهنده ناحیه بارگذاری زیاد نهایی است. در این ناحیه ترک به طول بحرانی رسیده است و موجب شده تا سطح مقطع باقیمانده قابلیت تحمل بار اعمالی را نداشته باشد.

در شکل (14-ب) سطح شکست دارای خطوط توقفی است که این نوارها منعکس کننده دوره های رشد هستند. در شکل (14- ج) در ناحیه بارگذاری زیاد مسیر رشد ترک نشان داده شده است که مسیر آن تقریباً بصورت زیگزاگ است. به نظر می رسد تغییرات ریزساختاری (یعنی فوق ریزدانگی) ناشی از تغییر شکل پلاستیکی شدید بر مسیر ترک اثر گذاشته است و موجب انحراف مسیر رشد ترک گردیده است.

سطوح شکست نمونه های ریختگی فرآوری شده FSP مشخصه های شکست تو رفتگی (حفره ای) را نشان می دهند. سطح شکست نسبتاً صاف همراه با تو رفتگی های کوچک که عاری از ترک ها و حفرات هستند، در نمونه های فرآوری شده FSP مشاهده می گردد. در نمونه های فرآوری شده، منبع ترک از سطوح زیرین است. ریزساختار همگن موجب می گردد تا انرژی پلاستیکی بصورت همگن توزیع شود. از آن‌جایی که فرآیند ترمومکانیکال موجب همگن سازی ریزساختار می گردد، لذا انرژی پلاستیکی بصورت یکنواخت در درون ماده توزیع شده و از بوجود آمدن مکان های تمرکز تنش در درون ماده جلوگیری می کند. این امر موجب می گردد تا استحکام و طول عمر خستگی ماده تحت فرآوری ترمومکانیکال افزایش یابد.سطوح شکست آلیاژهای Al-7075 ریختگی و فرآوری شده اصطکاکی اغتشاشی تحت تنش اعمالی یکسان 238MPa

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

که به ترتیب به طول عمرهای خستگی 36/000 سیکل و 80/000 سیکل منتج شده اند، در بزرگنمایی های مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. همانطور که در شکل (15-الف) و(15-ب) مشاهده می گردد، سطح شکست آلیاژ آلومینیوم ریختگی ناهموار بوده و دارای ترک، حفرات و صفحات شبه تورقی که حاکی از رفتار شکست ترد می باشد، است. در نمونه های ریختگی، جوانه زنی ترک با عیوب ریختگی مرتبط می باشد. در ریزساختار، ترک مسیر عیوب را پیموده است و موجب گردیده تا مسیر ترک ناهموار و ناصاف باشد. سطح شکست نمونه خستگی فرآوری شده آلیاژ آلومینیوم ریختگی 7075 فرآوری شده FSP نسبتاً صاف، مسطح و عاری از حفرات و ریزترک ها است شکل (16-الف). بوجود آمدن انشعاب های شاخه ای شکل (16-ب) در قسمت های میانی سطح شکست موجب افزایش سرعت رشد ترک و کاهش طول عمر خستگی شده است. این انشعاب ها بواسطه کاهش مقاومت ماده در برابر رشد ترک تحت تنش اعمالی 238MPa می باشد که به کاهش قابلیت بارگیری ماده فرآوری شده، منتج شده است. نتایج بررسی‌های سطح شکست آلیاژ آلومینیوم ریختگی فرآوری شده تأییدکننده نتایج آزمایشات خستگی بوده و در تطابق با نتایج گزارش شده توسط سایر محققین [1،3، 7 و 19] است.

4- نتیجه گیری

فرآوری FSP به واسطه قابلیت قابل ملاحظه ریزدانگی و حذف حفرات ریختگی باعث بهبود خواص خستگی شده است. از اینرو، FSP سبک شکست را از شبه ورقه ورقه شدگی به شکست تو رفتگی تغییر داده است و باعث افزایش قابل ملاحظه خواص کششی و خستگی می گردد.

ترکیب FSP با اعمال سیستم خنک‌کنندگی با ورودی 15°C- و خروجی 10 °C محلول خنک‌کننده می‌تواند علاوه بر حذف حفرات آلیاژ Al-7075 ریختگی، نقش مؤثری را در ایجاد ساختار فوق ریزدانه در سطح مقطع ورق مورد نظر فرآوری، ایفا نماید.

تبلور مجدد سریع موجب شده است تا اندازه دانه آلیاژ Al-7075 ریختگی از 60µm به اندازه متوسط 75 nm کاهش یابد. حذف حفرات (عیوب) و ایجاد ساختار فوق ریزدانه در ورق فرآوری شده FSP موجب افزایش استحکام تسلیم به میزان 300%، استحکام نهایی به میزان 158% و ازدیاد طول به میزان 235% نسبت به آلیاژ Al-7075 ریختگی شده است.

بررسی سطوح شکست نشان می دهد که افزایش استحکام های خستگی در نمونه های FSP در سطوح مختلف تنشی می تواند به واسطه مقاومت های بالاتر در برابر شروع ترک که از حذف عیوب ریختگی منتج شده است، باشد.

حذف عیوب ریختگی (حفره‌ها) و ایجاد ساختار فوق ریزدانه در ورق Al-7075 ریختگی فرآوری شده، موجب افزایش 11 برابری استحکام خستگی (در طول عمر 107 سیکل) و 8 برابری نسبت حد خستگی شده است.

منابع

[1] T. Löbel, D. Holzhüter, M. Sinapius, C. Hühne, A hybrid bondline concept for bonded composite joints, International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 68, pp. 229-238, 2016.

[2] F. Haddadi, F. Abu-Farha, Microstructural and mechanical performance of aluminium to steel high power ultrasonic spot welding, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 225, pp. 262-274, 2015.

[3] B. A. Hou M, Yuan Q, Welding techniques for polymer or polymer composite components,to ADVANCED COMPOSITE STRUCTURES AUSTRALIA Pty Ltd 2002.

[4] C. Ageorges, L. Ye, M. Hou, Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 32, No. 6, pp. 839-857, 2001.

[5] A. Yousefpour, M. Hojjati, J.-P. Immarigeon, Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 17, No. 4, pp. 303-341, 2004.

[6] R. H. Rizzolo, D. F. Walczyk, Ultrasonic consolidation of thermoplastic composite prepreg for automated fiber placement, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 29, No. 11, pp. 1480-1497, 2015.

[7] J. S. H. M. Roderic C. DonJohn W. Gillespie, Bonding techniques for high performance thermoplastic compositions,to University of Delaware 1997.

[8] S. H. McKnight, B. K. Fink, V. Monnard, P. E.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

Bourban, J. E. Manson, D. A. Eckel, Jr., AND J. W. Gillespie, Jr., processing and characterization of welded bonds between thermoset and thermoplastic composites, A. R. Lab, ed., 2001.
[9] M. H. R. Paton, A. Beehag, P. Falzon a breakthrough in assembly of aircraft composite structures, in 25th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, Hamburg, Germany 2006.
[10] M. Hou, Fusion Bonding of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Laminates, Advanced Materials Research, Vol. 626, pp. 250-254, 2013.
[11] M. Hou, Thermoplastic Adhesive for Thermosetting Composites, Materials Science Forum, Vol. 706-709, pp. 2968-2973, 2012.
[12] O. Schieler, U. Beier, Induction Welding of Hybrid Thermoplastic-thermoset Composite Parts, 2015.
[13] P. V. R. Irene Fernandez Villegas, high-temperature hybrid welding of thermoplastic (cf/peek) to thermoset (cf/epoxy) composites, in 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, 2015.
[14] I. F. Villegas, R. van Moorleghem, Ultrasonic welding of carbon/epoxy and carbon/PEEK composites through a PEI thermoplastic coupling layer, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 109,pp. 75-83, 2018.
[15] B. Harras, K. C. Cole, T. Vu-Khanh, Optimization of the Ultrasonic Welding of PEEK-Carbon Composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 15, No. 2, pp. 174-182, 1996.
[16] R. Nikoi, M. M. Sheikhi, N. Arab, Experimental Analysis of Effects of Ultrasonic Welding onWeld Strength of Polypropylene Composite Samples, 2015.
[17] S.-J. Liu, I.-T. Chang, Optimizing the Weld Strength of Ultrasonically Welded Nylon Composites, Journal of Composite Materials, Vol. 36, No. 5, pp. 611-624, 2002.
[18] S. J. Liu, I. T. Chang, S. W. Hung, Factors affecting the joint strength of ultrasonically welded polypropylene composites, Polymer Composites, Vol. 22, No. 1, pp. 132-141, 2001.
[19] TWI (2019). Schematic of ultrasonic welding machine. [image] Available at: https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/ultrasonic-welding-of-injection-moulded-components-part-1-process-and-equipment-061 [Accessed 9 Mar. 2019].
[20] G. Palardy, H. Shi, A. Levy, S. L. Corre, I.F. Villegas, A study on amplitude transmission in ultrasonic welding of thermoplastic composites, Composites Part A, Volume 113, October 2018, Pages 339-349.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]