

مطالعه رفتار مد I شکست آلومینیم آلیاژی ۶۰۶۱ فرآوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی

هادی قهرمان^۱، محمود ابراهیمی^{۲*}، ابودر اسحق اسکویی^۳، محمد زادشکویان^۴

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

^۳ محقق پسادکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت جنوب، شنزن، چین

^۴ دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

برجسته‌ها

- استحکام تسلیم و کششی نمونه فرآوری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی در مقایسه با نمونه اولیه آنیل شده به ترتیب ۳۷ و ۳۹ درصد افزایش داشته است.
- چقرمگی شکست برای نمونه فرآوری شده برابر با $10/86 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ محاسبه شد که ۱۴ درصد افزایش نسبت به نمونه اولیه نشان می‌دهد.
- مطابق نتایج آنالیز متالوگرافی، اندازه دانه‌ها به‌طور متوسط ۵۷ درصد کاهش یافته است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

*نویسنده مسئول:

ebrahimi@maragheh.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

تغییر شکل پلاستیکی شدید

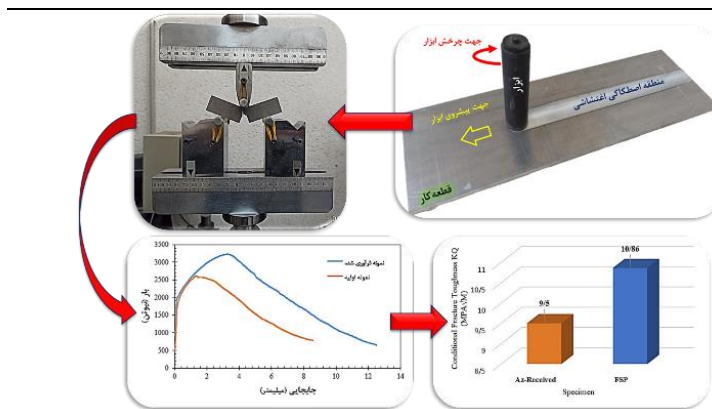
فرایند اصطکاکی-اغتشاشی

مکانیک شکست

چقرمگی شکست

رشد ترک

چکیده گرافیکی



چکیده

بررسی سازوکارهای ایجاد و رشد ترک و استخراج پارامترهای بحرانی شکست، از اهمیت ویژه‌ای در مواد مهندسی برخوردار است. از این رو مطالعه رفتار مکانیکی قطعات ترک‌دار تحت بار اعمالی طی فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید اجتناب‌ناپذیر است. در پژوهش حاضر، رفتار مد یک شکست، خواص مکانیکی و ریزساختاری نمونه آلومینیم آلیاژی AA60601-T6 فرآوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از دستگاه فرز، فرایند مذکور تا یک پاس به کمک ابزاری از جنس فولاد گرم کار بر روی نمونه‌های آلومینیمی انجام گردیده و طی آن ناحیه اغتشاش با کیفیت مطلوب ایجاد شد. با توجه به نتایج آزمون کشش، استحکام تسلیم و کششی نمونه فرآوری شده به ترتیب به ۳۷ و ۳۹ درصد افزایش یافت. بر اساس نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای، چقرمگی شکست برای نمونه فرآوری شده برابر با $10/86 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ به دست آمد که نشان‌دهنده ۱۴/۳ درصد افزایش نسبت به نمونه اولیه آنیل شده است. بر اساس نتایج متالوگرافی، متوسط اندازه دانه‌ها در نمونه‌های اولیه و فرآوری شده به ترتیب $35 \mu\text{m}$ و $15 \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد. لذا کاهش ۵۷ درصدی اندازه دانه در نمونه فرآوری شده، با افزایش هم‌زمان استحکام و چقرمگی همراه است. بر این اساس، استفاده از روش اصطکاکی-اغتشاشی می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای منجر به بهبود خواص مکانیکی و رفتار شکست آلومینیم شود.

۱- مقدمه

را با سهولت از طریق بهینه‌سازی کنترل نمود، به شرطی که جنبه‌های مختلف فرایند اصطکاکی-اغتشاشی و طراحی ابزار به‌طور مناسب تنظیم‌شده باشد [۵]. در فرایند اصطکاکی-اغتشاشی، وجود اغتشاش و حرارت در منطقه اغتشاشی، موجب تغییرات در توزیع ناخالصی‌ها و اندازه دانه در نواحی اطراف و مرکز منطقه اغتشاشی می‌شود [۴ و ۵] و اغلب یک ساختار گرادیان زیرسطحی با دانه‌های ریز تبلور مجدد هم‌محور با اندازه یکنواخت تشکیل می‌دهد که منجر به افزایش استحکام و سختی آلیاژ می‌شود [۷].

تاکنون، فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر روی آلومینیم، مس، تیتانیوم، آلیاژهای منیزیم، فولادها و آلیاژهای با آنروپی بالا اعمال‌شده است. راندمان فرایند اصطکاکی-اغتشاشی به نرخ چرخش ابزار، سرعت پیشروی ابزار و تعداد پاس‌ها بستگی دارد و بسته به نوع آلیاژ متغیر است [۹ و ۱۰]. البته با توجه به خواص عملی و مناسب فرایند اصطکاکی-اغتشاشی برای مواد ترموپلاستیک، از این فرایند برای اتصال مواد پلیمری نیز استفاده می‌شود و محققین زیادی روی این روش برای جوش دادن مواد پلیمری کار کرده‌اند [۹-۱۱].

این نکته حائز اهمیت است که رفتار مکانیکی ایده‌آل برای یک ماده، ترکیبی از استحکام بالا، شکل‌پذیری قابل‌قبول و چقرمگی شکست مناسب است. حد تسلیم، استحکام نهایی، شکل‌پذیری و سختی، یک سری از خواص مکانیکی هستند که بشدت به‌اندازه دانه بستگی دارند. ریزدانه کردن مواد یک ابزار مهم برای دستیابی به خواص عالی در مواد فلزی است.

به عبارتی، آنچه بر توانایی ماده به تغییرشکل پلاستیک شدید تأثیر داشته باشد بر ویژگی‌های شکست نیز مؤثر است. مکانیک شکست ارتباط بین چقرمگی شکست و اندازه ریزدانه را توصیف می‌کند. شاخه‌ای از علم که با فرایندهای شکست در مصالح و سازه‌های مهندسی سروکار دارد، مکانیک شکست نامیده می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت مکانیک شکست، مطالعه رفتار مکانیکی مواد ترک‌دار تحت بار اعمالی است. فرض کنید یک جسم جامد دارای ترک، تحت یک حالت بارگذاری پیوسته و افزایشی قرار می‌گیرد. در ابتدا ترک به‌طور پایدار رشد می‌کند تا زمانی که سطح تنش اعمال‌شده به مقدار بحرانی برسد. هنگامی که تنش اعمال‌شده بیشتر از مقدار بحرانی گردد، ترک منتشر می‌شود

یکی از ویژگی‌های مهم ریزساختاری مواد فلزی، اندازه دانه است که بر خواص نهایی تأثیر مستقیم دارد. این مهم باعث گردیده تا تولید مواد فلزی فوق‌ریزدانه و نانو ساختار بسیار مورد توجه قرار گیرد. این مواد به‌عنوان نسل جدیدی از مواد فلزی مطرح هستند که خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها در مقایسه با مواد درشت‌دانه به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهبود یافته است. تحقیقات زیادی برای توسعه فرایندهای تولید مواد فوق‌ریزدانه و نانو ساختار در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی صورت گرفته است. در این ارتباط، ثابت‌شده است که یکی از مؤثرترین طرق فرآوری مواد فوق‌ریزدانه، اعمال تغییرشکل پلاستیک شدید می‌باشد. از بین فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید، روش اصطکاکی-اغتشاشی^۱ در دهه‌های اخیر بسیار پیشرفت نموده و کاربردهای عملی و علمی زیادی پیدا کرده است [۱]. فرایند اصطکاکی-اغتشاشی برگرفته از فناوری جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی^۲ است که در سال ۱۹۹۱ توسط وین توماس در یک موسسه جوشکاری در کمبریج گسترش یافته است. روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی شامل جوشکاری اصطکاکی همراه با هم زدن مواد است و برای اتصال مواد در حالت جامد استفاده می‌شود. در هر دو روش، از یک روند مشابه استفاده می‌شود؛ در نتیجه اصطکاک بین ابزار کار و سطح مواد، گرما تولید می‌شود و در نتیجه تأثیر هم‌زمان کرنش و اصطکاک مواد تحت تغییرشکل پلاستیک قرار می‌گیرند [۲]. بنابراین جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی یک فرایند اتصال حالت جامد است که عموماً در اتصال آلیاژهایی که جوشکاری آن‌ها در یک فرایند معمولی جوشکاری مشکل است، کاربرد دارد [۳-۱]. همچنین جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی به دلیل نیاز به بازده انرژی بالا، صرفه اقتصادی و تطبیق‌پذیری بیشتر آن بر روی گروه‌های متنوعی از مواد، کاربردهای گسترده‌ای در سال‌های اخیر پیدا کرده است [۴-۶].

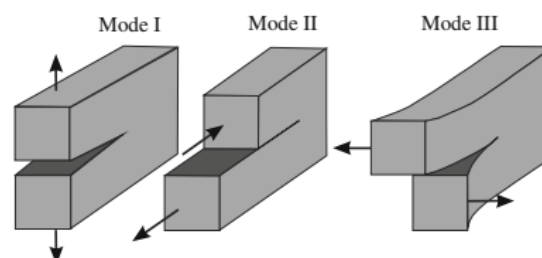
فرایند اصطکاکی-اغتشاشی یک تکنیک نوظهور اصلاح سطح است که از طریق آن می‌توان ریزساختار و خواص مکانیکی

¹ Friction stir processing (FSP)

² Friction stir welding (FSW)

در مطالعه‌ای [۲۰]، سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمایش پانچ برشی جهت بررسی تعیین نقش تخلخل‌ها و نانولوله‌های کربنی در مکانیسم‌های شکست آلومینیم و کامپوزیت انجام شد. نمونه‌های تولیدشده توسط روش پرس در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار با تعداد پاس‌های مختلف پس از شکست در برش، مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌های کامپوزیتی ریزدانه با استحکام بالاتر، مشخصات شکست ترد را از خود نشان دادند. در مطالعه‌ای دیگر، آلومینیم آلیاژی ۶۰۶۱ با درصد متفاوتی از کاهش ضخامت تحت نورد تبریدی قرار گرفته و نمونه‌های تغییرشکل یافته برای خواص کششی و شکست مورد بررسی قرار گرفتند [۲۱]. در مواد فرآوری شده با فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید، چقرمگی شکست می‌تواند کمتر از همتایان دانه‌درشت باشد. باین‌حال، تحمل آسیب از نظر چقرمگی شکست و استحکام می‌تواند قابل توجه باشد. علاوه بر این، برخلاف فلزات دانه‌درشت، شکل دانه و جهت نمونه می‌تواند نقش بسیار مهمی ایفا کند. در اغلب موارد، تنها اختلاف باریکی بین رفتار شکننده و شکل‌پذیر وجود دارد و این وابستگی به جهت‌گیری ممکن است منشأ خواص شکست استثنایی باشد. زمانی که فقط یک جهت (به‌عنوان مثال جهت تقسیم ترک) در نظر گرفته شود، وابستگی جهت‌گیری می‌تواند بحث مربوط به اندازه دانه در چقرمگی شکست را به یک کار بسیار دشوار تبدیل کند [۲۲]. سینها و همکاران [۲۳] مکانیسم‌های تغییرشکل آلیاژ آنترپپی بالای $Fe_{40}Mn_{20}Co_{20}Cr_{15}Si_5$ فرآوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی را طی سه پارامتر مختلف جهت توضیح وابستگی ریزساختاری مورد مطالعه قرار دادند. این پژوهش نشان‌دهنده محدودیت داکتیلیتی غیرهمگن و جلوگیری از جوانه‌زنی تخلخل‌ها و رشد آن‌ها در اثر اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بود. همچنین ژو و همکارانش [۲۴] تحول ریزساختار سطحی اتصالات آلومینیم-مس در طول جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی و تأثیر آن بر استحکام کششی و رفتار شکست را به تفصیل مورد بررسی قرار داده‌اند که نشان‌دهنده تشکیل فصل مشترکی از سه لایه فرعی از ترکیبات بین فلزی بود.

(رشد سریع) و در نتیجه جسم جامد می‌شکند. به‌منظور درک فرایند شروع رشد ترک، ابتدا باید رفتار مکانیکی یک جسم بدون ترک بر اساس ریزساختار آن و نحوه تغییرشکل الاستیک یا الاستیک-پلاستیک مربوطه مطالعه شود. ترکی را در یک جسم همگن و خطی الاستیک در نظر بگیرید که تحت یک حالت بارگذاری مشخص نسبت به راستای ترک قرار گرفته است و باعث ایجاد توزیع تنش در نوک ترک می‌شود که مسئول رشد پایدار است. در این حالت، منحنی بار-جابجایی برای تعیین سطح تنش بحرانی و ضریب شدت تنش بحرانی متناظر استفاده می‌شود که به تنش اعمال شده، اندازه نمونه، هندسه و طول ترک بستگی دارد. از این‌رو، رفتار مکانیکی یک جامد حاوی ترک با یک هندسه و اندازه خاص را می‌توان با ارزیابی عوامل شدت تنش کشسان K_{II} ، K_{I} و K_{III} پیش‌بینی کرد [۱۸-۱۲]؛ بنابراین یک جسم دارای ترک می‌تواند در سه حالت (مد) مختلف تحت تنش قرار گیرد که در شکل ۱ نشان داده شده است. تنش‌های عمودی (نرمال) باعث باز شدن دهانه ترک یا مد I می‌گردد و تغییر مکان سطوح ترک عمود بر صفحه ترک است. تنش‌های برشی که در امتداد صفحه ترک اعمال می‌گردند باعث گسترش ترک در مد II و یا مد لغزشی می‌گردند که تغییر مکان سطوح ترک در صفحه ترک بوده و عمود بر لبه خارجی ترک می‌باشد. مد III یا مد پارگی، در اثر اعمال تنش‌های برشی خارج از صفحه به وجود می‌آید. تغییر مکان سطوح ترک در صفحه ترک بوده ولی عمود بر لبه‌های کناری آن می‌باشد. جسم دارای ترک ممکن است در حالت کلی ترکیبی از مدهای فوق قرار گیرد، ولی معمولاً حالت I از اهمیت بیشتری برخوردار است.



شکل (۱): سه مد بارگذاری نسبت به راستای ترک؛ مد I: مد بازشدگی، مد II: مد لغزشی یا برشی، مد III: مد پارگی

[۱۹].

برای جلوگیری از ایجاد ترک در طول فرایند اصطکاکی-اغتشاشی، آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ باید تحت عملیات آنیل قرار گیرد. برای این منظور ابتدا ورق‌ها در ابعاد ۱۰۰mm در ۳۰۰mm با استفاده از دستگاه گیوتین برش داده شد و به‌منظور انجام عملیات آنیل تمام نمونه‌ها در داخل کوره در دمای °C ۳۴۰ به مدت ۲۱۰ دقیقه قرار داده شد. نمونه‌ها پس از اتمام این زمان در کوره تا دمای محیط سرد شد. برای این فرایند ابزاری موردنیاز است که برای تغییرشکل و تولید گرمای اصطکاکی، حرارت تولید کند. ماده اولیه ابزار از جنس فولاد H13 به قطر ۲۰ mm است. قطر شانه، قطر پین و ارتفاع پین ابزار به ترتیب ۲۰، ۵ و ۴/۵ mm است.

سرعت چرخش ابزار ۱۲۵۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ابزار ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و زاویه محور یا شیب ابزار نسبت به سطح قطعه کار ۳۰° انتخاب گردید. البته با ارتفاع پین ۵mm و قطر پین ۶mm با همان پارامترهای دستگاه، عمل اغتشاش به‌خوبی انجام نگیرد ولی کم کردن ارتفاع پین به ۴/۵ mm و قطر پین به ۵mm باعث هم زدن و مخلوط شدن متمرکزتری شده و عمل اغتشاش مطلوب‌تری حاصل شد. شکل ۲ جزئیات انجام فرایند اصطکاکی-اغتشاشی را نشان می‌دهد که بر روی یک ورق پیوسته انجام‌گرفته است نه دو ورق لب‌به‌لب. لازم به ذکر است که این تحقیق باهدف اصلی بررسی تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر رفتار شکست ماده انجام‌شده است و بررسی دقیق تأثیر پارامترهای مختلف بر فرایند شکل‌دهی و خواص آن مقوله دیگری است، لذا در این مطالعه به گزارش نتایج تغییر این پارامترها بر کیفیت ناحیه تغییرشکل داده‌شده پرداخته نشده و تنها شرایط حالت بهینه بحث شده است.

به‌طورکلی در انجام این فرایند ابزاری با شانه و پین ساده مورداستفاده قرار گرفت که به‌صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده‌شده است. جهت عملیات حرارتی و سخت‌کاری، ابزار آماده‌شده تا دمای آستنیت (دردمای °C ۷۲۳، به مدت ۶۰ دقیقه) حرارت داده‌شده و سپس در روغن سرد شد و بعد جهت بالا بردن چقرمگی ابزار، عملیات باز پخت در دمای °C ۵۰۰، به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد و در دمای اتاق سرد شد. برای آزمون کشش در مطالعه حاضر ابتدا نمونه‌ها با استاندارد ASTM B557 در نرم‌افزار اتوکد طراحی و سپس

پیشینه مفصل و تقریباً طولانی از مطالعات ارزشمندی که در رابطه با رفتار شکست در فرایند اصطکاکی اغتشاشی انجام‌گرفته است نشان می‌دهد که رفتار مد I شکست در آلومینیم AA60601-T6 فرآوری‌شده با روش اصطکاکی اغتشاشی به‌صورت جامع موردبررسی و مطالعه قرار نگرفته است. در تمامی تحقیقات بررسی‌شده توسط نویسندگان، عمدتاً از دید علم مواد به مسئله نگرسته شده است و برای بررسی رفتار شکست ماده فرآوری‌شده، تنها به انجام آزمایش‌های کشش اکتفا شده است و چنان‌که باید، از منظر مکانیک شکست به مسئله پرداخته نشده است. به‌عنوان مثال، اعداد و ارقام قابل اتکایی که میزان تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی را بر پارامتر چقرمگی شکست نشان دهد یافت نشد. لذا در پژوهش حاضر سعی شده است که رفتار مد I شکست نمونه‌های آلومینیم AA60601-T6 فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی به‌طور جامع مورد مطالعه قرار گیرد و از این رهگذر، این موضوع می‌تواند پژوهشی نو قلمداد شود. همچنین می‌تواند به‌عنوان مرجعی مناسب توسط دانشجویان، مهندسين و صنایع وابسته مورد مطالعه و استفاده قرار گیرد.

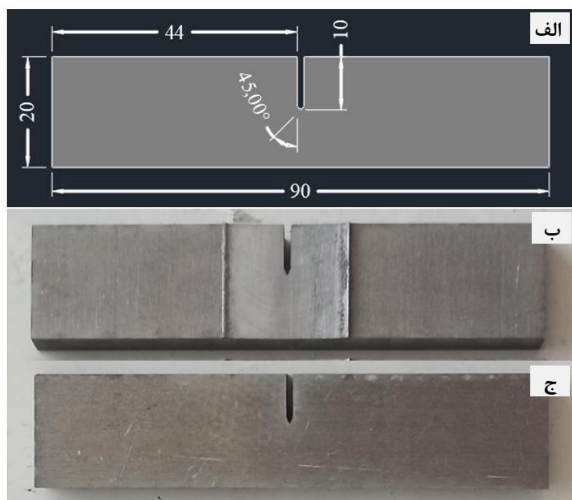
۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از ورق AA60601-T6 به ضخامت ۶mm استفاده‌شده است. بررسی آنالیز آلومینیم فوق با آزمون کوانتومتری ثابت پایه آلومینیم و استاندارد ASTM E1251 در دمای °C 23± انجام شد. ترکیب شیمیایی عناصر آلومینیم آلیاژی ۶۰۶۱ و درصد وزنی آن‌ها در جدول ۱ لیست شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی عناصر آلومینیم آلیاژی ۶۰۶۱ برحسب درصد وزنی.

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
۹۹.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Ca	Sr	Bi	V	Zr	Sn	Na
۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰

برای تعیین چقرمگی شکست نمونه‌ها از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای استفاده شد. ابتدا نمونه از نوع استاندارد SEN^۱ در نرم‌افزار اتوکد طراحی و سپس توسط دستگاه وایرکات^۲ مدل PW850A برش داده شدند. در شکل ۵ نمای از نمونه آزمون خمش به همراه ابعاد آن نشان داده شده است. پیش از انجام آزمایش چقرمگی شکست، یک ترک اولیه استاندارد ایجاد شد و سپس آزمون طبق استاندارد ASTM E129 در دمای محیط و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه با دستگاه Santam مدل STM-250 انجام گرفت. برای کاهش خطای آزمایش‌های تجربی، تمامی آزمایش‌ها حداقل پنج بار تکرار گردید و مقادیر میانگین، ملاک مقایسه قرار گرفتند. شکل ۵ نشان‌دهنده برش نمونه فرآوری شده و نمونه اولیه می‌باشد.



شکل (۵): (الف) ابعاد نمونه آزمون چقرمگی شکست؛ (ب) برش نمونه فرآوری شده (ج) برش نمونه اولیه

همچنین در پژوهش حاضر برای بررسی دقیق و علمی مقطع شکست نمونه‌های اولیه و فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی در آزمون خمش و چگونگی وقوع شکست، بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، شکست‌نگاری^۳ با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ و متالوگرافی به کمک میکروسکوپ نوری انجام گرفت.

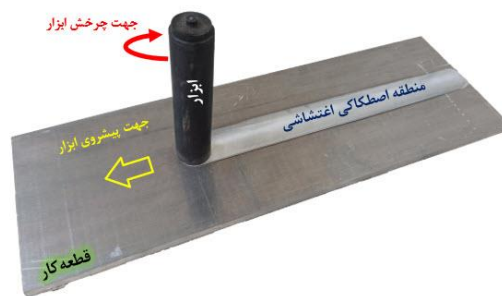
1 Single-edge notched (SEN)

2 Wire cutting machine

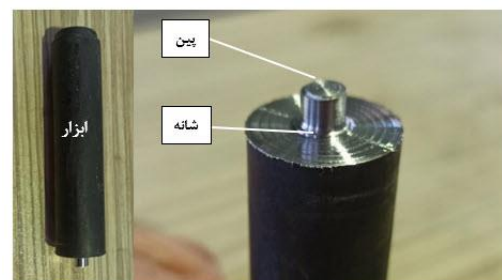
3 Fractography

4 Scanning electron microscope (SEM)

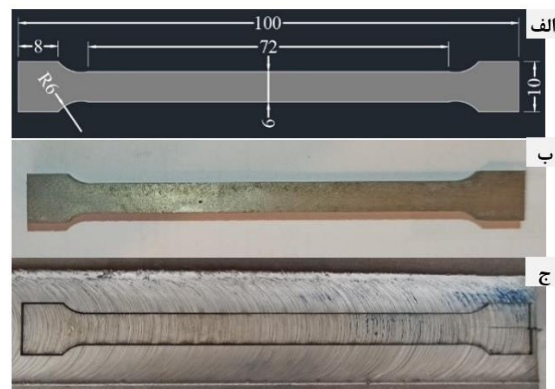
توسط دستگاه وایرکات مدل PW850A برش داده شدند. در شکل ۴ نمای از نمونه آزمون کشش به همراه ابعاد آن نشان داده شده است. نهایتاً آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8 در دمای محیط و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه با دستگاه Santam مدل STM-250 انجام گرفت تا نتایج نمونه اولیه و نتایج نمونه فرآوری شده مقایسه شوند. شکل ۴ نشان‌دهنده برش نمونه‌های فرآوری شده و اولیه می‌باشد.



شکل (۴): فرایند اصطکاکی-اغتشاشی با سرعت چرخش ابزار ۱۲۵۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ابزار ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و زاویه ابزار نسبت به سطح قطعه کار ۳ درجه.



شکل (۳): ابزار فرایند اصطکاکی-اغتشاشی؛ مواد اولیه ابزار از جنس فولاد H13 به قطر ۲۰ mm، قطر شانه ۲۰ mm، قطر بین ۵ mm و ارتفاع بین ابزار ۴/۵ mm می‌باشد.



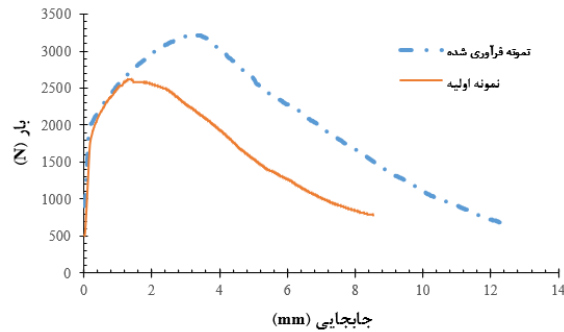
شکل (۲): (الف) ابعاد نمونه آزمون کشش؛ (ب) برش نمونه اولیه؛ (ج) برش نمونه فرآوری شده.

۳- نتایج و بحث

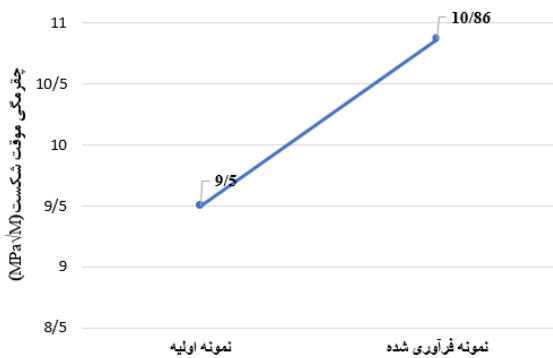
۳-۱- نتایج آزمون کشش

پارامترهای بحرانی شکست، قابل استناد می‌باشند؛ لذا در سراسر این پژوهش، منظور از چقرمگی شکست نیز، همان مقادیر ضریب شدت تنش بحرانی می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۶ و نمودار بار-جابجایی نمونه‌ها و مقایسه آن‌ها و با در نظر گرفتن مساحت زیر نمودارها که نمایانگر مقدار انرژی لازم برای شروع و رشد ترک می‌باشد، به خوبی مشهود است که چقرمگی شکست نمونه فرآوری شده بیشتر از چقرمگی شکست نمونه اولیه است.

با توجه به نتایج، نمونه AA60601 فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی تک‌پاسه توانست بهبود هم‌زمان استحکام و چقرمگی با کاهش اندازه دانه و ترکیبی بهینه از هر دو را ارائه دهد. مطابق شکل ۷، نمونه‌هایی که با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی تهیه شده‌اند، در مد I شکست، چقرمگی شکست بیشتری از خود نشان دادند. این افزایش به‌طور میانگین در حدود ۱۴/۵ درصد می‌باشد.



شکل (۶): نمودار مقایسه‌ای بار-جابجایی نمونه‌ها در دو حالت اولیه آنیل شده و فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی.



شکل (۷): نمودار چقرمگی شکست نمونه‌ها در دو حالت اولیه آنیل شده و فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی.

تحلیل داده‌های آزمون در چندین سطح انجام گردید که شامل محاسبه استحکام کششی به‌عنوان مقدار نیروی لازم بر واحد سطح مقطع برای شکست نمونه است که با توجه به داده‌های آزمون و خروجی نمودار تنش-کرنش حقیقی، استحکام تسلیم برای نمونه اولیه ۹۴MPa و برای نمونه فرآوری شده ۱۳۱MPa به دست آمد. استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه AA60601 فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی تک‌پاسه نسبت به نمونه اولیه به ترتیب به میزان ۳۹ و ۳۷ درصد افزایش یافته که علت آن می‌تواند کاهش شدید اندازه دانه در اثر اعمال کرنش‌های پلاستیکی شدید باشد.

۳-۲- نتایج آزمون چقرمگی شکست

در پژوهش حاضر، نمونه اولیه و فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی از نوع SEN، در خمش سه‌نقطه‌ای آزمایش گردید و خروجی نتایج تحت عنوان نمودار بار-جابجایی در شکل ۶ نشان داده شده است. از مقدار P_Q اندازه‌گیری شده هر آزمایش برای نمونه اولیه ($P_Q=1750N$) و برای نمونه فرآوری شده ($P_Q=2000N$)، چقرمگی موقت شکست K_Q با استفاده از معادلات ۱ تا ۳ قابل محاسبه است:

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{wf}(a/w)} \quad (1)$$

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{3\frac{s}{w}\sqrt{\frac{a}{w}}}{2\left(1+2\frac{a}{w}\right)\left(1-\frac{a}{w}\right)^{3/2}} \left[1.99 - \frac{a}{w}\left(1-\frac{a}{w}\right) \left\{ 2.15 - 3.93\left(\frac{a}{w}\right) + 2.7\left(\frac{a}{w}\right)^2 \right\} \right] \quad (2)$$

$$a, t \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3)$$

برای نمونه اولیه این مقدار برابر با $K_Q=9.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ و برای نمونه فرآوری شده برابر با $K_Q=10.86 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ محاسبه شد. از آنجاکه ضخامت و طول ترک نمونه‌ها کمتر از مقدار لازم طبق معادله ۳ می‌باشد، مقادیر استخراج شده به‌عنوان

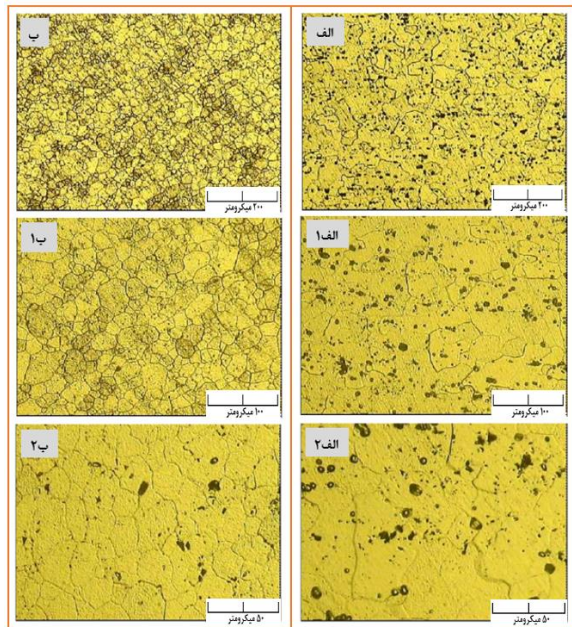
فرآوری شده نیز نشان‌دهنده ریزدانه شدن و تغییر چگالی مرزدانه‌ها است. تجزیه و تحلیل ریزساختاری نمونه‌های AA60601 توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که در نمونه فرآوری شده اندازه دانه‌ها در منطقه متأثر از حرارت مشابه اندازه دانه‌های نمونه اولیه است که عمدتاً به دلیل انجام مکانیسم بازیابی است. همچنین فرایند اصطکاکی-اغتشاشی به‌طور قابل توجهی بر ریزساختار تأثیر گذاشته است، به‌طوری‌که ریزساختار ناحیه اغتشاشی از نظر اندازه و نوع ریزساختار تغییر یافته است؛ بنابراین دانه‌های تبلور مجدد یافته، تغییر شکل شدید دانه، وجود حفره‌ها، ترک‌ها و عیوب موضعی را می‌توان در مناطق فرآوری شده مشاهده کرد که کاملاً متفاوت از ریزساختار نمونه اولیه است. نتایج متالوگرافی در شکل ۸ نشان می‌دهد منطقه اغتشاشی دارای ریزساختاری ریزدانه است که از دانه‌های هم‌محور و تبلور مجدد تشکیل شده است. مشاهدات میکروسکوپی برای منطقه اغتشاشی، چگالی نسبتاً کمتری از نابعی‌ها را در مقایسه با نمونه اولیه نشان می‌دهد. چنین نتیجه مشابهی در مطالعه‌ای [۲۵] مربوط به ریزساختار ناحیه اصطکاکی-اغتشاشی ورق‌های نازک ۵۰۵۲ نیز دیده شده است. همچنین کاهش اندازه دانه در فرایند اصطکاکی-اغتشاشی با نتایج تحقیقات مشابه بر روی آلیاژ آلومینیم سری A5XXX مطابقت دارد؛ به‌طوری‌که بسته به پارامترهای فرایند اصطکاکی-اغتشاشی کاهش ۲ تا ۱۲ درصد اندازه متوسط دانه آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ امکان‌پذیر است [۲۶]. در منطقه اغتشاشی، ریزساختار آلومینیم آلیاژی ۵۰۵۲، اندازه دانه‌ها با سرعت چرخش ابزار افزایش می‌یابد [۲۷]. همچنین مطابق نتایج آنالیز متالوگرافی، دانه‌ها در منطقه هم‌زده ریز بوده و اندازه دانه‌ها به‌طور متوسط ۵۷ درصد کاهش یافته است که نشان‌دهنده موفقیت فرایند مذکور در پژوهش حاضر است، به‌طوری‌که منطقه اغتشاشی و منطقه تحت تأثیر حرارت مکانیکی به ترتیب به صورت دینامیکی تبلور مجدد و بازیابی شده و ریزدانه کردن درشت‌دانه‌های نمونه اولیه AA60601 به‌درستی انجام شده است. متوسط اندازه دانه‌ها در نمونه اولیه ۳۵ μm و در نمونه فرآوری شده ۱۵ μm اندازه‌گیری شده است که از توزیع نسبتاً یکنواختی برخوردار می‌باشد.

در مطالعه دیگری [۲۵] که تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر چقرمگی شکست و رفتار رشد ترک در ورق‌های آلومینیم ۵۰۸۳ بررسی شده است، نتایج مشابهی با مطالعه حاضر حاصل شده است. اگرچه آزمون برای محاسبه K_{Ic} معتبر نیست، نتایج آزمون چقرمگی شکست، K_{Ic} برای نمونه‌های اولیه، جوشکاری و فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی به ترتیب برابر با ۲۴، ۱۷ و ۲۵ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ است. در مطالعه دیگری [۱۴]، رفتار کششی و شکست آلیاژ ۶۰۶۱ فوق‌ریزدانه فرآوری شده در شرایط مختلف آزمایش مانند آزمون خمش سه‌نقطه، نمونه کشش فشرده، نمونه ترک‌خورده مرکزی و نمونه ترک‌خورده دو لبه، بررسی شده است. نتایج همانند پژوهش حاضر، حاکی از آن است که مقادیر چقرمگی شکست آلیاژهای فرآوری شده، به دلیل اندازه دانه ریزتر و چگالی نابعی‌ها بالاتر، در مقایسه با هم‌تابان اولیه خود بیشتر می‌باشد.

۳-۳- نتایج متالوگرافی

به‌منظور بررسی ریزساختار نمونه فرآوری شده و مقایسه آن با نمونه اولیه، نمونه‌های متالوگرافی از ناحیه اغتشاشی تهیه شده و پس از آماده‌سازی توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفتند. تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به ریزساختار نمونه اولیه AA60601 و فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی با سرعت ابزار ۱۲۵۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۳۱ میلی‌متر در دقیقه، در شکل ۸ نشان داده شده است. ساختار میکروسکوپی نمونه اولیه و فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی در مرکز به‌صورت دانه‌های محلول جامد آلفا به همراه ترکیبات بین‌فلزی نامحلول در زمینه است. همان‌طوری‌که در شکل ۸ در بزرگ‌نمایی بالاتر (الف ۲) نمایش داده شده، نمونه اولیه از فلز پایه دارای ذرات تیره‌ای است که همان رسوبات و آخال‌ها در آلیاژ هستند. درحالی‌که در نمونه فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی (شکل ۸ ب ۲) این ذرات تیره به شکل قابل توجهی کاهش یافته‌اند که نشان از بهبود خواص مکانیکی نمونه فرآوری شده دارد. بررسی تصاویر الف مربوط به نمونه اولیه، دانه‌هایی درشت با مرزهایی متراکم از نابعی‌ها را نشان می‌دهد. تصاویر ب مربوط به نمونه

برجستگی‌های پارگی در تصاویر ب مؤید همین امر است. افزایش تنش شکست منجر به افزایش استحکام می‌شود که نتایج آزمون کشش این مهم را تأیید می‌کند. همچنین تصاویر نمونه اولیه (شکل ۹ الف) دارای درصد بیشتری از آخال‌ها هستند اگرچه هنوز رابطه‌ای بین چقرمگی شکست یک ماده و درصد آخال‌ها ارائه نشده است اما چقرمگی شکست با افزایش درصد آخال‌ها کاهش می‌یابد. گرچه در هر دو نوع نمونه، حفره به تعداد زیاد مشاهده می‌شود ولی به‌وضوح مشاهده می‌شود که فرایند اصطکاکی-اغتشاشی باعث افزایش چگالی تورق در سطح شکست شده است که نمایانگر رفتار شکست ترد است، از طرفی به همان نسبت از تعداد حفره‌ها کاسته شده است. واضح است که به‌طور قطع نمی‌توان ادعا کرد که نمونه‌های فرآوری شده بدون نقص می‌باشند، بخصوص که در شکل ۹ حفره‌هایی در سطح نمونه مشاهده می‌شود؛ باین‌حال می‌توان گفت با توجه به تجربه نویسندگان تحقیق و آزمایش‌های انجام‌شده، تلاش بر این بوده است که مطلوب‌ترین حالت ممکن حاصل شود.



شکل ۸): تصاویر میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی‌های متفاوت مربوط به ریزساختار منطقه اغتشاشی نمونه‌های AA60601 (الف) نمونه‌های اولیه؛ ب) نمونه‌های فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی با سرعت ابزار ۱۲۵۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۳۱ میلی‌متر در دقیقه.

مطالعاتی که در این مورد بر روی آلومینیم AA60601 انجام‌گرفته است، نتایج پژوهش حاضر را تأیید می‌کند. برای نمونه، نتایج مطالعه‌ای [۲۸] نشان می‌دهد که میانگین اندازه دانه برای نمونه‌های ۶۰۶۱ فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی برای پاس‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۶/۸۵، ۵/۸۲، ۶/۱۵ و ۶/۸۳ μm بود. اگرچه هیچ رابطه مستقیمی با تعداد پاس‌های فرایند با اندازه دانه مشاهده نشد، اما آشکار است که روش اصطکاکی-اغتشاشی به‌طور قابل‌توجهی اندازه دانه نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین مشخص شد که کاهش اندازه دانه منجر به بهبود استحکام مواد و شکل‌پذیری می‌شود. نتیجه مشابهی نیز در مطالعه مالوفیف و همکارانش [۲۹]، مشاهده شده است. میانگین اندازه دانه در آلیاژ AA60601 در منطقه اغتشاشی از ۱ تا ۵ μm متغیر بود، بنابراین، فرایند اصطکاکی-اغتشاشی منجر به پالایش دانه می‌شود که نشان‌دهنده تبلور مجدد دینامیکی است.

۳-۴- نتایج شکست نگاری

در پژوهش حاضر شکست‌نگاری نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی سطوح شکسته شده برای درک چگونگی شکست انجام گردید. مقطع شکست نمونه‌ها بلافاصله از ناحیه شروع رشد ترک در آزمون شکست در شکل ۹ برای مقایسه نمایش داده شده است.

همان‌طوری که مشخص است سطوح شکست شامل تعداد زیادی حفره هستند که نشانگر شکست نرم بوده و نهایتاً شکست و گسترش آن از طریق اتصال این حفره‌ها پدید می‌آید. شکست‌نگاری نمونه فرآوری شده با روش مذکور (شکل ۹ ب) نشان می‌دهد که هر چه دانه‌ها ریزتر باشد موانع مؤثر (مرزدانه‌ها) برای متوقف کردن ریزترک‌ها افزایش‌یافته و در نتیجه ترک مجبور است به‌طور مرتب جوانه‌زده و برای تغییر جهت در صفحه گسترش ترک و در دانه مجاور انرژی زیادی را مصرف کند. این چرخش ترک در مرزدانه‌ها به ایجاد طرح رودخانه‌ای در سطوح شکست تورقی منجر می‌شود. همچنین می‌توان این‌طور توجیه کرد که ساختار ریزدانه ترک‌های ریزتری ایجاد می‌کند، بنابراین تنش لازم برای شکست افزایش می‌یابد که وجود

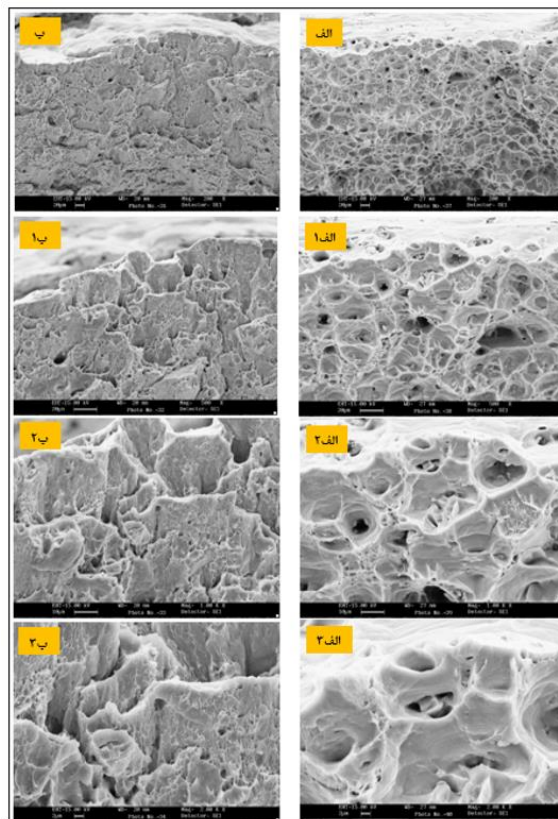
پراکنده در سطوح شکست نمونه‌های آلیاژ AA5083 فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی مشاهده شده است. در مطالعه مدی و همکاران [۳۱]، شکست‌نگاری سطح شکست نمونه آلومینیوم AA6061 فرآوری شده با جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی نشانگر وجود تعداد زیاد گودی با اشکال و اندازه‌های مختلف بود که مبین شکست نرم بود.

۴- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به انجام فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر روی نمونه‌های آلیاژ آلومینیومی پرداخته است. نمونه‌های فرآوری شده به روش مذکور و همچنین نمونه‌های اولیه تحت آزمون کشش ساده و آزمون شکست استاندارد قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که فرایند اصطکاکی-اغتشاشی علاوه بر ارتقای خواص مکانیکی عمومی ماده، باعث بهبود مقاومت ماده در برابر رشد ترک نیز شده است. میزان این افزایش برای استحکام تسلیم، کششی و ضریب شدت تنش بحرانی به ترتیب برابر با ۳۹، ۳۷ و ۱۴/۳ درصد می‌باشد. همچنین، بررسی تصاویر متالوگرافی و شکست‌نگاری نشان می‌دهد که فرایند مذکور باعث ریزدانه‌تر شدن نمونه شده و میزان تردی ماده افزایش یافته است.

۵- مراجع

- [1] Zykova AP, Tarasov SY, Chumaevskiy AV, Kolubaev EA. A review of friction stir processing of structural metallic materials: Process, properties, and methods. *Metals*. 2020;10(6):772.
- [2] Iwaszko J, Kudła K, Fila K, Strzelecka M. The effect of friction stir processing (FSP) on the microstructure and properties of AM60 magnesium alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016;61(3):1555.
- [3] Thapliyal S, Mishra A. Machine Learning for Friction Stir Welding. In *Advanced Computational Methods in Mechanical and Materials Engineering*. 2021;21:43-56.
- [4] Ebrahimi M, Par MA. Twenty-year uninterrupted endeavor of friction stir processing by focusing on copper and its alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;781:1074-1090.
- [5] Gairola S, Jayaganthan R. XFEM Simulation of Tensile and Fracture Behavior of Ultrafine-Grained Al 6061 Alloy. *Metals*. 2021;11(11):1761.



شکل (۹): مشاهدات ریزساختاری مقطع شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی‌های متفاوت بر روی سطوح شکسته شده: نمونه‌های الف) اولیه؛ نمونه‌های ب) فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی با سرعت ابزار ۱۲۵۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۳۱ میلی‌متر در دقیقه.

نتایج تحقیقات قبلی، با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. به‌عنوان نمونه، بررسی‌های ریزساختاری سطوح شکست جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی-اغتشاشی ورق‌های AA6061 [۲۹] حاکی از آن است که گودی‌های کوچک و پراکنده موجود در نمونه نشان‌دهنده شکست نرم و کیفیت اتصال مناسب بود. این را می‌توان به انتشار ترک از طریق ناحیه اغتشاشی نسبت داد. نواحی نزدیک به سوراخ جوش نقطه‌ای حاوی فرورفتگی‌های کوچک‌تری بود که در نتیجه اغتشاش شدید و پدیده ریزدانه شدن بود. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح شکست در نمونه بدون پین نیز حالت شکست نرم با فرورفتگی‌های کشیده را نشان می‌داد. در مطالعه آکچای [۳۰] نیز، این فرورفتگی‌های

during equal-channel angular pressing. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2014;21:pages 990-998.

[18] Malopheyev S, Vysotskiy I, Zhemchuzhnikova D, Mironov S, Kaibyshev R. On the fatigue performance of friction-stir welded aluminum alloys. *Materials*. 2020; 13(19):4246.

[19] Yazdi SR, Beidokhti B, Haddad-Sabzevar M. Pinless tool for FSSW of AA 6061-T6 aluminum alloy. *Journal of materials processing technology*. 2019;267:44-51.

[20] Wu J, Djavanroodi F, Shamsborhan M, Attarilar Sh, Ebrahimi M. Improving mechanical and corrosion behavior of 5052 aluminum alloy processed by cyclic extrusion compression. *Metals*. 2022;12(8):1288.

[21] Elyasi M, Aghajani Derazkola H, Hosseinzadeh M. Investigations of tool tilt angle on properties friction stir welding of A441 AISI to AA1100 aluminium. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2016;230(7):1234-41.

[22] Derazkola HA, Aval HJ, Elyasi M. Analysis of process parameters effects on dissimilar friction stir welding of AA1100 and A441 AISI steel. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2015;20(7):553-62.

[23] Derazkola HA, Elyasi M. The influence of process parameters in friction stir welding of Al-Mg alloy and polycarbonate. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;35:88-98.

[24] Elyasi M, Derazkola HA. Experimental and thermomechanical study on FSW of PMMA polymer T-joint. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97(1):1445-56.

[25] Eyvazian A, Hamouda AM, Aghajani Derazkola H, Elyasi M. Study on the effects of tool tile angle, offset and plunge depth on friction stir welding of poly (methyl methacrylate) T-joint. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2020;234(4):773-87.

[26] Derazkola HA, Garcia E, Elyasi M. Underwater friction stir welding of PC: Experimental study and thermo-mechanical modelling. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021 65:161-73.

[27] Elyasi M, Derazkola HA, Hoseinzadeh M. Study on joint zone Microstructure Evolution and Hardness in Friction Stir welding of AA1100 Aluminum alloy to A441 AISI steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(14):97-107.

[6] Ebrahimi M, Shaeri MH, Naseri R, Gode C. Equal channel angular extrusion for tube configuration of Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;731:569-576.

[7] Kuna M. Finite elements in fracture mechanics. *Solid Mechanics and Its Applications*. 2013; 201:153-92.

[8] Ebrahimi M, Wang Q, Attarilar Sh. A comprehensive review of magnesium-based alloys and composites processed by cyclic extrusion compression and the related techniques. *Progress in Materials Science*. 2023;131:101016.

[9] Balakrishnan V, Roshan P, Goel S, Jayaganthan R, Singh IV. Experimental and XFEM simulation of tensile and fracture behavior of al 6061 alloy processed by severe plastic deformation. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2017;6(1):55-72.

[10] Hohenwarter A, Pippin R. Fracture and fracture toughness of nanopolycrystalline metals produced by severe plastic deformation. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015;373(2038):20140366.

[11] Sinha S, Nene SS, Frank M, Liu K, Lebensohn RA, Mishra RS. Deformation mechanisms and ductile fracture characteristics of a friction stir processed transformative high entropy alloy. *Acta Materialia*. 2020;184:164-78.

[12] Xue P, Xiao BA, Ma ZY. Effect of interfacial microstructure evolution on mechanical properties and fracture behavior of friction stir-welded Al-Cu joints. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015;46(7):3091-103.

[13] Ebrahimi M, Djavanroodi F, Tiji SAN, Gholipour H, Gode C. Experimental Investigation of the equal channel forward extrusion process. *Metals*. 2015;5(1):471-483.

[14] Gairola S, Jayaganthan R. XFEM Simulation of Tensile and Fracture Behavior of Ultrafine-Grained Al 6061 Alloy. *Metals*. 2021;11(11):1761.

[15] Lim YB, Lee KJ. Microtexture and Microstructural Evolution of Friction Stir Welded AA5052-H32 Joints. *Journal of Welding and Joining*. 2019;37(2):35-40.

[16] Roudini G, Shiri SG, Rahvard MM. Tool design and speed parameters effects on microstructure and tensile strength of friction stir welding (FSW) 5052 Al alloys. In *Applied Mechanics and Materials* 2012;110:3165-3170

[17] Ebrahimi M, Attarilar Sh, Gode C, Djavanroodi F. Damage prediction of 7025 aluminum alloy

- [28] Elyasi M, Aghajani H, Hosseinzadeh M. Effects of friction stir welding parameters on mechanical quality of AA1100 aluminum alloy to A441 AISI steel joint. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(4):379-90.
- [29] Rahmatabadi D, Hashemi R, Mohammadi B, Shojaei T. Experimental investigation of plane stress fracture toughness for aluminum sheets produced by cold roll bonding process. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(2),101-108.
- [30] Rahmatabadi D, Ahmadi M, Pahlavani M, Hashemi R. DIC-based experimental study of fracture toughness through R-curve tests in a multi-layered Al-Mg (LZ91) composite fabricated by ARB. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;883, 160843.
- [31] Medhi T, Das A, Pankaj P, Kapil S, Biswas P. Multi-pass friction stir lap welding of AA 6061-T6: Implication of tool pin overlapping on microstructure and mechanical properties of joints. *Metals*. 2018;11(15):1669.



Mode I Fracture Behavior of 6061 Aluminum Alloy Processed by Friction Stir Processing

Hadi Ghahreman¹, Mahmoud Ebrahimi^{2*}, Abuzar Es'haghi Oskui³, Mohammad Zadshakoyan⁴

¹ M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

² Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

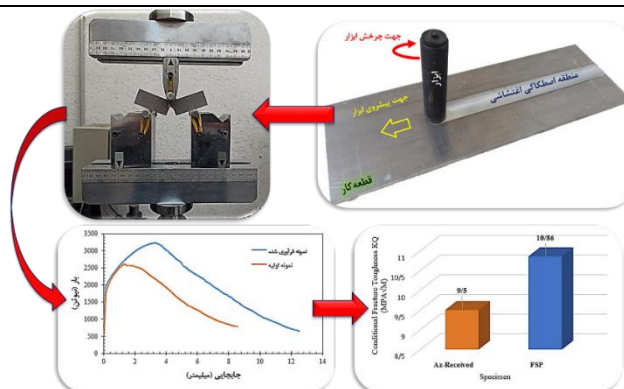
³ Postdoctoral researcher, Department of Mechanics and Aerospace Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, China

⁴ Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

HIGHLIGHTS

- The yield and ultimate tensile strength of the FSP-processed sample increased by 39% and 37%, respectively, compared to the as-received annealed sample.
- The fracture toughness of the FSP-processed sample was equal to 10.86 MPa√m, which showed a 14.3% increase compared to the annealed condition.
- About 57% reduction was obtained on the average grain size of the FSP-processed sample compared to the annealed state.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 8 December 2022

Received in revised form: 25 December 2022

Accepted: 7 February 2023

Available online: 20 February 2023

*Correspondence:

ebrahimi@maragheh.ac.ir

How to cite this article:

H. Ghahreman, M. Ebrahimi, A.E. Oskui, M. Zadshakoyan. Mode I fracture behavior of 6061 aluminum alloy processed by friction stir processing. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(2):83-94.

Keywords:

Severe plastic deformation

Friction stir processing

Fracture mechanics

Fracture toughness

Crack growth

ABSTRACT

Crack nucleation mechanisms, its growth, and the determination of critical failure parameters are of industrial importance. Therefore, it is inevitable to study the mechanical behavior of cracked materials under applied load during severe plastic deformation. The present study studied the mode I fracture behavior, mechanical properties, and microstructure characterization of the 6061 aluminum alloy fabricated by friction stir processing (FSP). For this purpose, a milling machine made a perfect stirring zone to perform the FSP method with the specific non-consumable tool. According to the tensile test results, the yield and ultimate tensile strength of the FSP-processed sample have increased by 39% and 37%, respectively. Based on the three-point bending test, the fracture toughness of the processed aluminum was calculated as 10.86 MPa√m, which shows a 14.3% improvement compared to the as-received annealed state. Eventually, the average grain size of the annealed and processed samples was measured as 35 and 15, respectively, which indicated a 57% reduction in the aluminum grain size after FSP. Note that this grain refinement is associated with improved strength and toughness.

* Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Imam Hossein University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

