

مطالعه رفتار شکست آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی تحت بارگذاری مود مرکب

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران،
 vahid.hasan@yahoo.com
 دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران،
 ghahreman.h@yahoo.com
 دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران،
 ebrahimi@maragheh.ac.ir
 محقق پساکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه علم و صنعت جنوب، شنزن، چین،
 oskouei.a.e@gmail.com
 دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،
 zadshakoyan@tabrizu.ac.ir

حسن وحید

هادی قهرمان

محمود ابراهیمی*

ابوذر اسحق‌ی اسکویی

محمد زادشکویان

چکیده

در دو دهه اخیر، فرایند اصطکاکی-اغتشاشی به‌عنوان یکی از روش‌های مهم تغییرشکل پلاستیک شدید، به‌دلیل مزایای منحصربه‌فردش، مورد توجه فراوان محققین قرار گرفته است. با این حال، تاکنون مطالعه‌ای در خصوص بررسی رفتار ماده فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی در حضور ترک صورت نگرفته است. لذا در این تحقیق، خواص مکانیکی، ریزساختاری و رفتار شکست آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی تحت بارگذاری مود مرکب داخل صفحه (کششی-برشی) با استفاده از روش کار اساسی شکست مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که استحکام تسلیم و کششی نمونه فراوری شده به‌ترتیب افزایش ۴۷ و ۶۷ درصدی در مقایسه با نمونه اولیه آئیل شده از خود نشان می‌دهد که به دلیل ریزدانه‌گی ساختار آن (کاهش ۵۷ درصدی اندازه‌دانه) می‌باشد. براساس نتایج آزمون شکست، کار اساسی شکست در مود مرکب برای نمونه فراوری شده نسبت به نمونه اولیه، بطور میانگین ۳۳ درصد کاهش یافته است. بنابراین، اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی می‌تواند منجر به بهبود قابل‌ملاحظه خواص مکانیکی و در عین حال، افت محسوس خواص مکانیک شکست آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ شود.

واژه‌های کلیدی: تغییرشکل پلاستیک شدید، مواد فوق‌ریزدانه، چقرمگی شکست، رشد ترک، استحکام کششی، شکست نگاری.

Mixed-mode fracture behavior of 6061 aluminum alloy processed by friction stir processing

H. Vahid

H. Ghahreman

M. Ebrahimi

A. Es'haghi Oskui

M. Zadshakoyan

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

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

Department of Manufacturing and Production Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

In the last two decades, friction stir processing (FSP), as one of the prominent severe plastic deformation methods, has received much attention from researchers due to its unique advantages. However, so far there has been no study on the behavior of the FSP-processed materials in the presence of cracks. So, this work investigated the mixed-mode (tensile-shear) failure, mechanical, and microstructure properties of the FSP-processed 6061 aluminum alloy, utilizing the essential work method of fracture. According to the tensile test, both the yield and ultimate tensile strengths of the processed sample showed an increase of 47% and 67%, respectively, due to the intensive grain refinement (57% reduction in grain size). Based on the fracture test, the essential work of fracture in the processed sample was 11 kJ/m², which is 33% less than that of its initial annealed counterpart. Therefore, while the friction stir processing can substantially improve the mechanical strength of the 6061 aluminum alloy, its fracture toughness has significantly decreased.

Keywords: Severe plastic deformation; Ultrafine-grained materials; Fracture toughness; Crack growth; Tensile strength; Fractography.

این فرایند، وجود همزمان اغتشاش و گرما در منطقه اغتشاشی که بوسیله اصطکاک بین پین و قطعه‌کار به وجود می‌آید تغییراتی در توزیع ناخالصی‌ها و اندازه‌دانه در نواحی مرکز و اطراف آن ایجاد می‌شود که اغلب منجر به تشکیل ساختاری با دانه‌های ریز هم‌محور تبلور مجدد یافته، شده که نهایتاً منجر به افزایش استحکام و سختی نمونه می‌گردد [۲-۴]. تاکنون، مطالعات زیادی بر روی آلیاژهای آلومینیوم، مس،

۱- مقدمه

فرایند اصطکاکی-اغتشاشی یک تکنیک نوین اصلاح سطحی ماده در زیر دمای ذوب بوده که از طریق آن می‌توان ریزساختار و خواص مکانیکی را با سهولت کنترل نمود، به شرطی که بتوان پارامترهای مختلف فرایند و هندسه ابزار را به‌طور مناسب تنظیم کرد [۲،۱]. در

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ebrahimi@maragheh.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳/۰۱/۲۰۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳/۰۶/۲۰۲۳

تیتانیوم، منیزیم، فولاد و آلیاژهای با آنتروپی بالا فراوری شده با فرایند فرایند اصطکاکی-اغتشاشی صورت گرفته است. نتایج نشان داده‌اند که کارایی فرایند اصطکاکی-اغتشاشی به نرخ چرخش ابزار، سرعت پیشروی ابزار و تعداد پاس‌ها بستگی داشته که بسته به نوع آلیاژ متغیر است [۶،۵]. همچنین، با توجه به خواص مکانیکی مطلوب حاصل از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر روی فلزات و آلیاژها، از این فرایند برای اتصال مواد پلیمری نیز استفاده گردیده است [۷-۹].

رفتار مکانیکی ایده‌آل برای یک ماده، ترکیبی از استحکام بالا، شکل‌پذیری قابل‌قبول و چقرمگی شکست مناسب است. در این زمینه، کار اساسی شکست^۱ روشی است که می‌تواند برای ارزیابی چقرمگی شکست مواد، مفید واقع شود. این روش با نوعی از شکل‌پذیری ناخالص سر و کار دارد که می‌تواند در حالت شکست تنش صفحه‌ای رخ دهد [۱۰]. روش کار اساسی شکست وسیله‌ای برای تقسیم‌بندی انرژی مربوط به شکست به دو قسمت است که اولین بار توسط بروبرگ پیشنهاد شده است. قسمت اول مربوط به شکست ماده می‌باشد، درحالی‌که قسمت دوم به تغییر شکل پلاستیک ناخالصی مربوط بوده که به هندسه نمونه شکست بستگی دارد. ایشان پیشنهاد داده‌اند که ناحیه غیرالاستیک در نوک ترک باید به دو ناحیه که در آن شکست رخ می‌دهد و ناحیه خارجی اطراف آن که شکل‌پذیری ناخالصی و اتلاف انرژی بیشتری رخ می‌دهد، تقسیم شود [۱۱]. در ادامه، این نظریه توسط کوتزل، ردل و مای برای فلزات و آلیاژها توسعه داده شد. در این راستا، کوتزل و همکارانش، کار ویژه نوک ترک را کار اساسی شکست (W_e) و کار انجام شده در ناحیه خارجی را کار غیر اساسی^۲ نامیده‌اند [۱۳،۱۲،۱۰].

مطالعات پیشین نشان داده است که رشد ترک و نهایتاً شکست سازه‌های ترک‌دار به‌تنهایی نتیجه بارگذاری مود I نبوده بلکه با بارگذاری مود II و حتی مود مرکب همراه می‌باشد [۱۴،۱۵]. از طرف دیگر، با توجه به اینکه جلوگیری از شروع ترک و گسترش آن برای نگهداری تجهیزات و سازه‌ها در کنار تشخیص شروع ترک بسیار مهم است، مطالعه تحقیق حاضر حائز اهمیت می‌باشد. در این زمینه، بررسی پیشنهاد مطالعات در خصوص رفتار شکست مواد فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی نشان می‌دهد که رفتار مود مرکب شکست در مواد فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی به روش کار اساسی شکست مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش سعی شده است که رفتار شکست آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی تحت بارگذاری مود مرکب به روش کار اساسی شکست مورد بررسی قرار گیرد و از این رهگذر، پژوهشی نو قلمداد می‌شود.

۲- مواد و روش تحقیق

ماده مورد استفاده در این تحقیق، نمونه‌های ورقه‌ای شکل به ضخامت ۶ میلی‌متر از جنس آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ می‌باشد که آنالیز شیمیایی آن به روش کوانتومتری^۳ در دمای ۲۳ درجه سلسیوس انجام

شد. در این راستا، ترکیب شیمیایی نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ و درصد وزنی هر کدام از آن‌ها در جدول ۱ لیست شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ مورد مطالعه در این تحقیق برحسب درصد وزنی.

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
پایه	۰/۴۳۰	۰/۳۴۳	۰/۲۲۲	۰/۰۹۹	۰/۹۳۰	۰/۰۲۵
Ca	Sr	Bi	V	Zr	Sn	Na
۰/۰۱۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴



شکل ۱- ابزار فرایند اصطکاکی-اغتشاشی مورد استفاده در این تحقیق؛ ماده اولیه ابزار از جنس فولاد H13 به قطر ۲۰ میلی‌متر، قطر شانه ۲۰ میلی‌متر، قطر پین ۵ میلی‌متر و ارتفاع پین ۴/۵ میلی‌متر می‌باشد.

نمونه‌ها ابتدا در ابعاد ۱۰۰ در ۳۰۰ میلی‌متر با استفاده از دستگاه گیوتین برش داده شده و سپس جهت انجام عملیات آنیلینگ کامل به‌منظور تنش‌زدایی و شکل‌پذیری بهتر نمونه‌ها در داخل کوره در دمای ۳۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۱۰ دقیقه قرار گرفت. لازم به ذکر است که نمونه‌ها پس از اتمام این زمان در کوره تا دمای محیط سرد شدند. ابزار مورد استفاده برای این فرایند نیز از جنس فولاد ابزار گرم‌کار H13 می‌باشد که به قطر ۲۰ میلی‌متر تهیه شد. در این زمینه، قطر شانه، قطر پین و ارتفاع پین ابزار به‌ترتیب ۲۰، ۵ و ۴/۵ میلی‌متر انتخاب شد. شکل ۱ ابزار استفاده شده برای فرایند اصطکاکی-اغتشاشی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به‌منظور عملیات حرارتی (سخت‌کاری)، ابزار تهیه شده تا دمای آستینیت (دمای ۷۲۳ درجه سلسیوس) به مدت ۶۰ دقیقه حرارت داده شده و سپس در روغن سرد گردید و سپس برای افزایش چقرمگی ابزار، عملیات بازپخت در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه انجام گرفت.

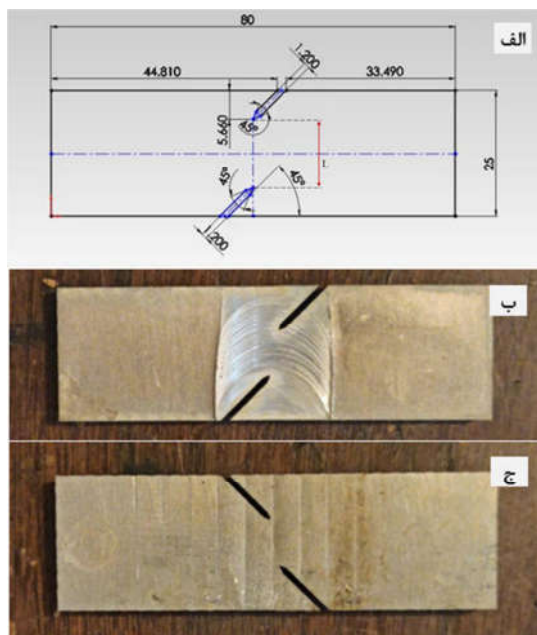
برای این مطالعه، سرعت چرخش ابزار ۱۲۵۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ابزار ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و زاویه محور یا شیب ابزار نسبت به سطح قطعه کار ۳ درجه انتخاب گردید. نتایج تجربی نشان داد که ابزار فرایند با ارتفاع و قطر پین به‌ترتیب ۴/۵ و ۵ میلی‌متر باعث هم زدن و مخلوط شدن متمرکزتری در ماده شده و اغتشاش مطلوبی حاصل می‌شود. در این راستا، شکل ۲ جزئیات انجام فرایند اصطکاکی-اغتشاشی را بر روی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ نشان می‌دهد.

¹ Essential work of fracture (EWF)

² Non-essential work

³ Quantometry

دمای محیط و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه با دستگاه SANTAM مدل STM-250 انجام گرفت. اصطلاح لیگامنت، به ناحیه‌ای از نمونه که دارای پیش ترک نمی‌باشد و سالم هست اطلاق می‌شود. با توجه به اینکه این ناحیه معمولاً تحت تاثیر تغییر شکل پلاستیک قابل‌توجهی قرار دارد، در فرایند شکست مورد توجه می‌باشد. توجه شود که این ناحیه در شکل ۴ با حرف L نمایش داده شده است. نیروها و جابه‌جایی‌ها به صورت خودکار در حین انجام آزمون کشش توسط دستگاه ثبت گردید. همچنین، مقدار کار اساسی شکست برای هر نمونه پس از انجام آزمون کشش مورد محاسبه قرار گرفت. برای کاهش خطای آزمون‌های تجربی، هر مورد حداقل سه بار تکرار گردید و مقادیر میانگین گزارش گردید.



شکل ۴- الف) ابعاد نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ برای آزمون شکست به روش کار اساسی شکست؛ ب) نمونه فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی؛ ج) نمونه اولیه آنیل شده.

در نهایت، شکست‌نگاری^۴ با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ برای بررسی دقیق‌تر مقطع شکست و چگونگی وقوع آن در نمونه‌های اولیه و فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

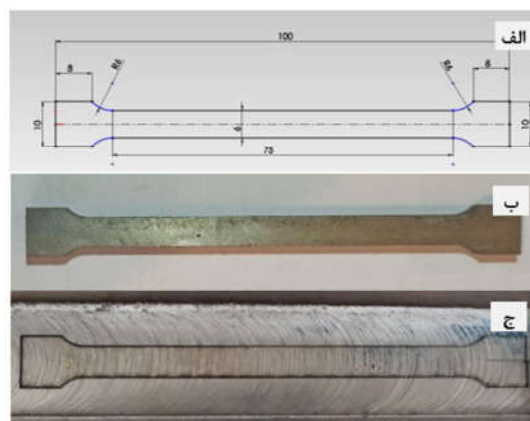
۳-۱- آزمون کشش

آزمون کشش بر روی هر دو نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در حالات اولیه آنیل شده و فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که استحکام تسلیم نمونه اولیه و فراوری شده به ترتیب ۸۴ و ۱۱۹ مگاپاسکال می‌باشد که حاکی از



شکل ۲- فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر روی نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در سرعت چرخش ابزار ۱۲۵۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ابزار ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و زاویه ابزار نسبت به سطح قطعه کار ۳ درجه.

نمونه‌های فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی به منظور سنجش خواص مکانیکی و مقایسه با حالت اولیه آنیل شده، تحت آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM B557 قرار گرفتند. برای این منظور، نمونه‌های کششی توسط دستگاه وایرکات^۱ مدل PW850A برش داده شد که در شکل ۳ نمایی از آن به همراه ابعاد در نظر گرفته شده نشان داده شده است. نهایتاً آزمون کشش در دمای محیط و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه با کمک دستگاه SANTAM مدل STM-250 انجام گرفت.



شکل ۳- الف) ابعاد نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ آماده شده برای آزمون کشش؛ ب) نمونه اولیه آنیل شده؛ ج) نمونه فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی.

برای سنجش رفتار شکست نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی، از نظریه کار اساسی شکست استفاده شد. برای این منظور، ابتدا قطعات آلومینیومی به شکل نمونه کششی دولبه ترک دار^۲ توسط دستگاه وایرکات مدل PW850A برش داده شدند. در شکل ۴ نمایی از نمونه‌های تهیه شده برای آزمون کار اساسی شکست به همراه ابعاد آن آورده شده است. پیش از انجام آزمایش شکست، ترک‌های اولیه نمونه‌های آزمایش با طول لیگامنت‌های^۳ ۶، ۷، ۸ و ۹ میلی‌متر ایجاد شدند و سپس آزمون در

^۱ Wire cutting machine

^۲ Double edge notch tension (DENT)

^۳ Ligament

^۴ Fractography

^۵ Scanning electron microscopy (SEM)

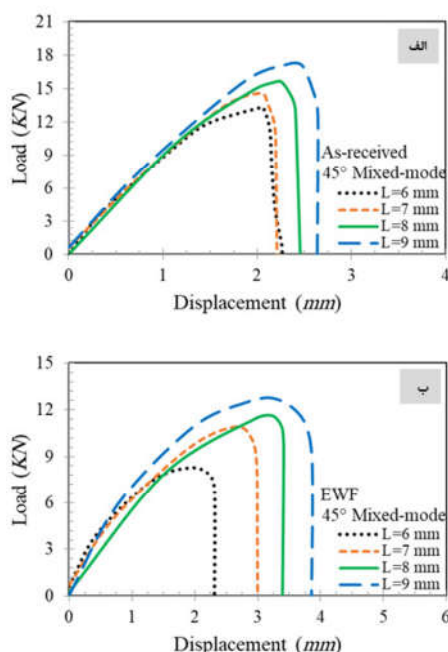
افزایش ۴۲ درصدی می‌باشد. همچنین، استحکام کششی نهایی نمونه فراوری شده نسبت به نمونه اولیه آنیل شده به میزان ۶۷ درصد افزایش یافته است که علت آن پالایش دانه‌های ماده (رابطه هال-پچ)^۱ در اثر اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی می‌باشد.

برای تبدیل ساختار ماده با دانه‌های نسبتاً درشت به دانه‌های بسیار ریز وجود دو عامل اساسی است. عامل اول اعمال کرنش‌های شدید پلاستیکی است تا چگالی بالایی از نابجایی‌ها ایجاد گردد و عامل دوم مرتب شدن مجدد نابجایی‌ها برای تشکیل یک ردیف از مرزدانه‌ها می‌باشد. فرایند ریزشدن دانه‌ها در طول روش اصطکاکی-اغتشاشی در چندین مرحله اتفاق می‌افتد. در ابتدا، نابجایی‌هایی که در سراسر دانه‌ها توزیع شده‌اند به شکل منظمی به منظور کاهش انرژی کرنشی کل در کنار هم در سلول‌هایی واحد قرار می‌گیرند. با اعمال کرنش‌های پلاستیکی بالا، نابجایی‌های بیشتری تولید می‌شود که منجر به توسعه دانه‌ها شده و به تدریج دانه‌های فرعی ایجاد می‌شوند. فرایند مذکور در داخل دانه‌ها تا زمانی که دانه‌ها به اندازه کافی ریز شوند و بتوانند بچرخند ادامه پیدا می‌کند. نهایتاً تغییر شکل پلاستیکی بیشتر باعث می‌شود که مرزدانه‌هایی با زاویه‌های بزرگ به وجود آیند. در این مطالعه، افزایش مرزهای با زاویه بالا در نمونه فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی، احتمال لغزش مرزدانه‌ای را نیز افزایش داده و منجر به بهبود شکل‌پذیری ماده گردیده است. مطالعه ریزساختار نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در ادامه آورده شده است.

۳-۲- آزمون شکست

در این مطالعه، نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در حالات اولیه آنیل شده و فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی تحت بارگذاری مود مرکب (کشش-برشی) از نوع دنت دولبه شکافدار با زاویه ۴۵ درجه، قرار گرفته و نتایج به صورت نمودار نیرو-جابجایی در شکل ۵ آورده شده است. لازم به ذکر است که سطح زیر نمودار بار-جابجایی در شکل ۵ نمایانگر مقدار انرژی لازم برای شروع و رشد ترک می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که چقرمگی شکست نمونه آلومینیومی فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی کمتر از چقرمگی شکست نمونه اولیه آنیل شده است. همچنین یک هماهنگی بر اساس طول ناحیه اتصال در نمونه ترک دارهای مختلف در منحنی‌های فوق‌الذکر مشهود است. با این توضیح که با افزایش طول ناحیه اتصال در نمونه ترک دار، مقدار بیشینه نیرو و میزان جابه‌جایی تا نقطه شکست افزایش می‌یابد. لذا با توجه به شباهت رفتار منحنی‌های بار-جابجایی برای تمامی ناحیه اتصال در نمونه ترک دارها می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییر شکل و آهنگ رشد ترک‌های موجود بر روی نمونه‌های آلومینیومی در ناحیه اتصال در نمونه ترک دارهای مختلف یکسان بوده است، بطوری که نقطه بیشینه بر روی هر منحنی متناظر با محل تسلیم کامل آن ناحیه اتصال در نمونه ترک دار می‌باشد. بعد از تسلیم ناحیه اتصال در نمونه ترک دار، ترک‌ها از دو طرف و از نوک ترک‌های تعبیه شده بر روی نمونه، شروع به رشد کرده و نهایتاً به شکست کامل قطعه کار می‌انجامد [۱۴].

از طرف دیگر، با توجه به درصد کشیدگی نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه فراوری شده آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ با روش اصطکاکی-اغتشاشی، مقاومت آن در برابر رشد ترک کاهش محسوسی یافته است. همچنین با توجه به روند تغییرات منحنی‌ها می‌توان گفت که یک تغییر شکل پایدار حین فرایند اصطکاکی-اغتشاشی در نمونه‌های فراوری شده در مقایسه با نمونه اولیه آنیل شده ایجاد شده که در ادامه به آن پرداخته شده است.



شکل ۵- نمودار بار-جابجایی آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در دو حالت الف) اولیه آنیل شده و ب) فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی در طول ناحیه اتصال در نمونه ترک دارهای مختلف ۶، ۷، ۸ و ۹ میلی‌متر.

۳-۳- کار اساسی شکست

در حالت کلی، نظریه کار اساسی شکست بیان می‌کند که کل انرژی مورد نیاز برای شکست (W_T) نمونه‌ای دارای ترک می‌تواند به کار اساسی شکست (W_e) و کار غیراساسی (پلاستیک) شکست (W_p) تقسیم شود. کار اساسی شکست، کار صرف شده برای رشد ترک و ایجاد یک سطح جدید در ناحیه فرایند شکست داخلی^۳ (که در آن فرایند شکست واقعی اتفاق می‌افتد) می‌باشد، در حالی که، کار غیراساسی یا پلاستیک شکست کاری است که در ناحیه تغییر شکل پلاستیک بیرونی^۴ مصرف می‌شود و در آن انواع مختلفی از تغییر شکل پلاستیک مانند ترک، تسلیم برشی و ریزتخلیه ممکن است عمل کنند. در این زمینه، رابطه بین کار شکست و اجزای آن را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۱۲، ۱۰]:

$$W_T = W_e + W_p \quad (۱)$$

کار اساسی شکست (W_e) اساساً انرژی سطحی است که مقدار آن

^۲ Non-essential or plastic work of fracture (W_p)

^۳ Inner fracture process zone

^۴ Outer plastic deformation zone

^۱ Hall-Petch effect

جدول ۲- مقادیر کار اساسی و غیراساسی شکست (پلاستیک شکست) برای نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در حالات قبل و بعد از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی.

شرایط نمونه	W_e (N/mm)	βW_p (N/mm ²)	R^2
اولیه آتیل شده	۴۷/۵	۱۱/۲	۰/۹۹۴
فرآوری شده	۱۱	۱۰/۸	۰/۹۸۷

با یادآوری این نکته که میزان مقاومت ماده در برابر رشد ترک و یا همان، کل انرژی موردنیاز برای شکست (W_t)، از مجموع کار اساسی شکست (W_e) و کار غیراساسی یا پلاستیک شکست (W_p) حاصل می شود، مطابق شکل ۶ و با توجه به مقادیر بدست آمده از جدول ۲، نتیجه گرفته می شود که با اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱، علیرغم افزایش استحکام تسلیم و کششی، مقاومت ماده در برابر رشد ترک بطور میانگین دچار افت ۳۳٪ می شود. این نکته حائز اهمیت است که افزایش استحکام دلیل بر افزایش مقاومت ماده در برابر رشد ترک نیست و نباید این دو موضوع را لزوماً وابسته به هم دانست. لذا این نتیجه مهم حاصل می شود که علیرغم افزایش استحکام ماده و بهبود خواص مکانیکی عمومی آن تحت اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی، مقاومت ماده در برابر رشد ترک کاهش می یابد. این رفتار می تواند به عوامل مختلفی مانند به وجود آمدن تخلخل هایی در ناحیه اغتشاشی نمونه فرآوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی مرتبط باشد و یا به دلیل عوامل ریزساختاری مثل افزایش بیش از اندازه چگالی نایجایی ها اتفاق افتاده باشد. چنین نتیجه ای در مطالعه های دیگری در مورد استفاده از نمونه تیر خمشی سه نقطه ای، حاصل شده است [۱۶]. بایستی توجه شود که میزان مقاومت ماده در برابر رشد ترک، به دو عامل استحکام ماده و میزان قابلیت شکل پذیری (و به نوعی چقرمگی) آن بستگی دارد. درست است که در این فرایند، استحکام ماده فرآوری شده افزایش یافته است، ولی میزان شکل پذیری آن، به واسطه این فرایند تغییر شکل، کاهش یافته است. لذا به نظر می رسد که در مجموع، در رابطه با این ماده خاص (آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱)، تاثیر عامل دوم بیشتر از عامل اول بوده است.

۳-۳- تغییرات ریزساختاری

تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به ریزساختار نمونه اولیه آتیل شده آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ و نمونه فرآوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که اندازه دانه نمونه آلومینیومی در اثر اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی به طور قابل توجهی کاهش یافته است. لازم به ذکر است که در آلایزهای آلومینیوم به دلیل بالا بودن انرژی نقص چیده شدن اعتقاد بر اینست که تبلور مجدد دینامیکی دلیل اصلی کاهش شدید اندازه دانه ها در طول فرایند اصطکاکی-اغتشاشی می باشد.

مطالعات پیشین صورت گرفته در خصوص فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید نشان می دهد که کرنش های برشی، عامل اصلی ریزدانه‌گی در نمونه های فرآوری شده است. نتایج حاصل شده در این تحقیق نیز حاکی از نقش موثر کرنش های برشی در ریزدانه‌گی نمونه های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در اثر اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی می باشد. در خصوص مکانیزم تقسیم دانه ها (ریزدانه‌گی)، می توان به

متناسب با سطح لیگامت بوده و کار پلاستیک شکست (W_p) انرژی مرتبط با حجم است که متناسب با حجم ناحیه تسلیم شده می باشد. بر این اساس، می توان نوشت:

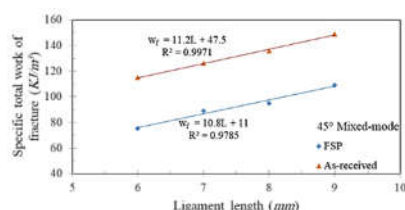
$$W_e = w_e L t \quad (۲)$$

$$W_p = w_p \beta L^2 t \quad (۳)$$

که در روابط بالا، L طول ناحیه اتصال در نمونه ترک دار، t ضخامت نمونه و β ضریب شکل مرتبط با ناحیه پلاستیک است. با جایگذاری روابط (۲) و (۳) در معادله (۱):

$$w_f = \frac{W_f}{L t} = w_e + \beta w_p L \quad (۴)$$

لازم به ذکر است که کار ویژه کلی شکست با استفاده از منحنی های بار-جابجایی محاسبه شده و براساس طول ناحیه اتصال در نمونه ترک دارهای مختلف در شکل ۶ ترسیم شده است. برای بدست آوردن کار ویژه کلی شکست بایستی مساحت زیر منحنی های بار-جابجایی محاسبه شده و بر حاصل ضرب ضخامت نمونه و طول ناحیه اتصال در نمونه ترک دار مربوطه تقسیم شوند [۱۴]. این مقادیر تحت عنوان کار ویژه کلی شکست بر اساس طول ناحیه اتصال در نمونه ترک دارهای مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است.



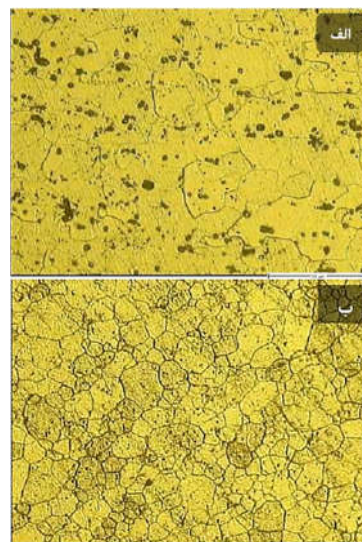
شکل ۶- نمودار کار ویژه کلی شکست در مود مرکب به عنوان تابعی از طول ناحیه اتصال در نمونه ترک دار برای نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در حالات قبل و بعد از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی.

کار ویژه کلی شکست را می توان با ادغام ناحیه زیر منحنی های بار-جابجایی برای هر نمونه تعیین کرد. بنابراین با محاسبه سطوح زیر منحنی های بار-جابجایی می توان یک ارتباط خطی بین کار ویژه کلی شکست و طول ناحیه اتصال در نمونه ترک دار مطابق با شکل ۶ مشاهده نمود. همچنین با توجه به رابطه (۴)، کار ویژه کلی شکست تابعی خطی از طول ناحیه اتصال در نمونه ترک دار است. بنابراین کار اساسی شکست را می توان از تابع رگرسیون^۱ خطی، متناسب با نمودار کل انرژی موردنیاز برای شکست برحسب طول ناحیه اتصال در نمونه ترک دار تعیین نمود. لذا، شیب این خط برابر با βW_p خواهد بود [۱۳، ۱۲].

با در نظر گرفتن توضیحات بالا، می توان نتیجه گرفت که با برون یابی خطی کار ویژه کلی شکست در شکل ۶، می توان کار اساسی شکست را بدست آورد. در این رابطه، شیب خطوط، نشان دهنده مولفه پلاستیکی نمونه ها است. نهایتاً، در جدول ۲ مقایسه مقادیر کار اساسی و غیراساسی شکست برای نمونه های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در حالات قبل و بعد از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی آورده شده است.

¹ Regression

افزایش قابل ملاحظه چگالی نایجایی‌ها در اثر اعمال کرنش‌های برشی شدید اشاره نمود. تجمع نایجایی‌های تولید شده به تدریج می‌تواند منجر به تشکیل مرزهای تصادفی و یا مرزهای هندسی شود. مشخص شده است که مرزهای تصادفی از به دام افتادن و یا قفل شدن نایجایی‌های در حال حرکت پدید می‌آید درحالی‌که مرزهای هندسی به دلیل سیستم‌های لغزشی متفاوت و یا اختلاف در کرنش‌های موضعی در نواحی مختلف دانه‌ها ایجاد می‌شود. در ادامه، قسمت‌هایی که با مرزهای تصادفی و مرزهای هندسی احاطه شده‌اند به ترتیب سلول‌ها و بلوک‌های سلولی را تشکیل می‌دهند. با افزایش مقدار کرنش برشی اعمالی بر نمونه، زاویه عدم انطباق هر دو نوع مرز ذکر شده افزایش یافته و منجر به تشکیل مرزهای کوچک زاویه (مرزهای فرعی) می‌شوند. با توجه به اینکه، سرعت افزایش زاویه عدم انطباق در مرزهای هندسی بیشتر از مرزهای تصادفی است، مرزهای هندسی و به تبع آن بلوک‌های سلولی، بیشتر به مرزهای بزرگ زاویه تبدیل می‌شوند. در مطالعه اخیر، متوسط اندازه دانه در نمونه اولیه آنیل شده برابر با ۳۵ میکرومتر بوده که در اثر اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی مقدار آن به ۵ میکرومتر می‌رسد. نتیجه مشابهی نیز در مطالعه‌ی مربوط به رفتار ریزساختاری ناحیه اصطکاکی-اغتشاشی ورق‌های نازک آلومینیوم آلیاژی ۵۰۵۲ گزارش شده است [۱۷]. همچنین، نتایج مطالعه دیگری بر روی آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی نشان می‌دهد که میانگین اندازه دانه در پاس‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب به ۵/۸، ۵/۸، ۶/۸ و ۴/۸ میکرومتر می‌رسد [۱۸]. باید خاطرنشان کرد که اگرچه تاکنون هیچ رابطه مستقیمی بین تعداد پاس‌های فرایند و اندازه دانه گزارش نشده است، اما آشکار است که فرایند اصطکاکی-اغتشاشی به طور قابل توجهی اندازه دانه مواد را کاهش می‌دهد.



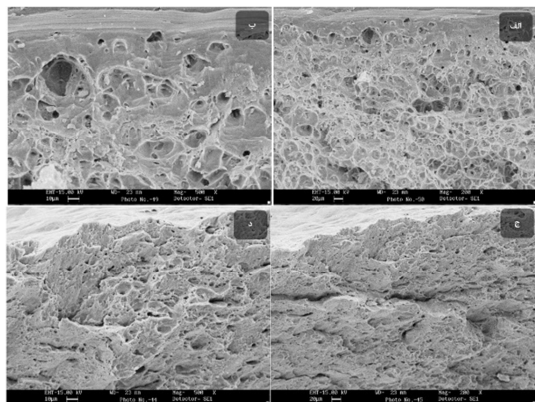
شکل ۷- تصاویر ریزساختاری مربوط به آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱: (الف) نمونه اولیه آنیل شده و (ج) نمونه فراوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی.

رفتار ریزساختاری بدست آمده در این تحقیق، نتایج آزمون کشش

را نیز تایید می‌کند. هنگامی که نایجایی‌ها به مرزدانه‌ها می‌رسند به علت متفاوت بودن جهت‌گیری دانه‌ها، لغزش آن‌ها از یک دانه به دانه دیگر با مشکل روبرو خواهد شد. بنابراین مرز دانه‌ها به عنوان مانعی برای لغزش نایجایی‌ها شناخته می‌شوند. بنابراین دلیل افزایش استحکام در آزمون کشش پژوهش حاضر، مواد فوق‌ریزدانه تولید شده در اثر اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی می‌باشد. مطالعات پیشین حاکی از آنست که در آلیاژهای فوق‌ریزدانه تولید شده با فرایندهای مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید [۲۱-۱۹]، مکانیزم افزایش چگالی نایجایی‌ها به صورت برهم‌کنش بین نایجایی‌ها در داخل دانه‌های زمینه می‌باشد. همچنین، مکانیزم استحکام‌دهی ناشی از مرزدانه به صورت برهم‌کنش بین نایجایی‌ها و مرز دانه‌ها است. هر دو مکانیزم ذکر شده، مکانیزم‌های اصلی استحکام‌بخشی مواد محسوب می‌شوند [۲۴-۲۲].

۴-۳- شکست‌نگاری

نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ پس از آزمون شکست به منظور بررسی مکانیزم سطح شکست، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی شکست‌نگاری شدند که نتایج آن در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشد. لازم به ذکر است که مقطع شکست نمونه‌ها از ناحیه شروع رشد ترک در آزمون شکست انجام گرفته است.



شکل ۸- تصاویر مقطع شکست نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ پس از آزمون شکست: (الف و ب) نمونه اولیه آنیل شده و (ج و د) نمونه فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی.

شکست‌نگاری نمونه آلومینیومی فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی (شکل ۸ ج و د) نشان می‌دهد که ظاهر سطح شکست با نوع بارگذاری تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، سطح شکست تحت بارگذاری کششی تورقی^۱ است که با وجود طرح رودخانه‌ای که جهت ترک گسترش یافته است اثبات می‌شود. از طرف دیگر، هر چه دانه‌ها ریزتر باشد موانع موثر بخصوص مرزدانه‌ها برای متوقف کردن ریزترک‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه، ترک مجبور خواهد شد که به طور مرتب جوانه زده و انرژی زیادی را برای تغییر جهت در صفحه گسترش ترک و در دانه‌های مجاور مصرف کند. این چرخش ترک در مرزدانه‌ها به ایجاد طرح رودخانه‌ای در سطوح شکست تورقی منجر می‌شود.

¹ Cleavage

- AA1100 and A441 AISI steel. Science and Technology of Welding and Joining. 2015; 20(7):553-562.
- [6] 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.
 - [7] 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):1445-1456.
 - [8] Eyvazian A, Hamouda AM, Aghajani Derazkola H, Elyasi M. Study on the effects of tool tilt 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):773-787.
 - [9] Ghahreman H, Ebrahimi M, Oskui A.E, Zadshakoyan M. Mode I fracture behavior of 6061 aluminum alloy processed by friction stir processing. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(2):83-94.
 - [10] Eshaghi Oskui A, Haddadi E, Ebrahimi M. A technical approach toward pre-crack generation and its effect on the fracture behavior of polymeric materials. Engineering Fracture Mechanics. 2022; 15(274):108780.
 - [11] Babaei Molke Taleh R, Mashhadi Keshitban P, Eshaghi Oskui A. Investigation of mode-I fracture behavior by essential work of fracture during the single-point incremental forming process. Engineering Failure Analysis. 2023; 154: 107677.
 - [12] Barany T, Czigány T, Karger-Kocsis J. Application of the essential work of fracture (EWF) concept for polymers, related blends and composites: A review. Progress in Polymer Science. 2010; 35(10):1257-1287.
 - [13] Oskui AE, Soltani N. Experimental and numerical investigation of the effect of temperature on mixed-mode fracture behaviour of AM60 Mg alloy. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2019; 42(10):2354-2371.
 - [14] Haddadi E, Choupani N, Abbasi F. Experimental and numerical investigation of mode II fracture toughness of rubber-toughened polymethyl methacrylate by using the essential fracture work. Modares Mechanical Engineering. 2016; 16(3):132-140.
 - [15] Oskui AE, Soltani N. Experimental and numerical investigation of the effect of temperature on mixed - mode fracture behaviour of AM60 Mg alloy. Journal of Materials Science. 2019; 42(10): 2354-2371.
 - [16] Gairola S, Jayaganthan R. XFEM Simulation of Tensile and Fracture Behavior of Ultrafine-Grained Al 6061 Alloy. Metals. 2021; 11(11):1761.
 - [17] 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.
 - [18] 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.
 - [19] Ebrahimi M, Shaeri MH, Gode C, Armoon H, Shamsborhan M. The synergistic effect of dilute alloying and nanostructuring of copper on the improvement of mechanical and tribological response. Composites Part B: Engineering. 2019; 164:508-516.
 - [20] 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.
 - [21] Attarilar Sh, Djavanroodi F, Ebrahimi M, Al-fadhalah Kh, Wang L, Mozafari M. Hierarchical microstructure tailoring of pure titanium for enhancing cellular response at tissue-implant interface. Journal of Biomedical Nanotechnology. 2021; 17(1):115-130.
 - [22] Derazkola HA, Kordani N, Derazkola HA. Effects of friction stir welding tool tilt angle on properties of Al-Mg-Si alloy T-joint. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2021; 33:264-276.

به عبارت دیگر می‌توان گفت که ساختار ریز و حتی فوق‌ریزدانه، ترک‌های ریزتری ایجاد می‌کند، بنابراین تنش لازم برای شکست افزایش یافته که وجود برجستگی‌های پارگی در تصاویر فوق‌الذکر موید همین امر است. همچنین، افزایش تنش شکست منجر به افزایش استحکام گردیده که نتایج آزمون کشش این مهم را تایید می‌کند. اگرچه در هر دو حالت نمونه آلومینیومی (اولیه و فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی)، تعداد زیادی حفره قابل‌مشاهده است ولی به‌وضوح مشخص است که فرایند اصطکاکی-اغتشاشی باعث افزایش چگالی تورق در سطح شکست نمونه می‌شود که نمایانگر رفتار شکست ترد است. لذا، به همان نسبت از تعداد حفره‌ها کاسته شده است. نهایتاً پله‌های شکست در تصاویر شکل ۸ ج و د نشان‌دهنده موقعیت محلی است که جبهه ترک پس از عبور از دو طرف حفره‌های کروی به هم وصل شده‌اند. همچنین وقتی شکست تحت تنش برشی رخ می‌دهد سطح شکست حاوی یک سری علائم شانه‌ای است که احتمالاً منعکس کننده به هم پیوستن تعداد زیادی ریزترک ناشی از کشش می‌باشد که نسبت به سطح کشش زاویه دارند. از طرف دیگر، نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ اولیه آنیل شده (شکل ۸ الف و ب) دارای تعداد زیادی حفره در اشکال و اندازه‌های مختلف است که مبین شکست نرم می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، روش کار اساسی شکست بر روی نمونه‌های کششی-برشی دارای ترک ۴۵ درجه دولبه برای ارزیابی مقاومت ماده در برابر رشد ترک تحت بارگذاری مود مرکب برای آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که فرایند اصطکاکی-اغتشاشی موجب بهبود خواص مکانیکی عمومی (استحکام تسلیم و کششی) ماده در اثر ریزدانه‌سازی ساختار می‌شود. با این حال، به دلیل افت شکل‌پذیری ماده، مقاومت ماده در برابر رشد ترک کاهش می‌یابد، بطوری‌که آهنگ رشد ترک تحت بارگذاری مود مرکب (کششی-برشی) در نمونه‌های فراوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی سریع‌تر از نمونه اولیه آنیل شده است. در این راستا، کار ویژه کلی شکست در آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری شده با فرایند اصطکاکی-اغتشاشی تحت بارگذاری مود مرکب، کمتر از نمونه اولیه (آنیل شده) آن است.

۵- مراجع

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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):379-390.
- [4] 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.
- [5] Derazkola HA, Aval HJ, Elyasi M. Analysis of process parameters effects on dissimilar friction stir welding of

- [۲۳] آقاجانی، حسام. کردانی، ناصر. آقاجانی دارزکلا، حامد. (۱۳۹۹). تحلیل اثر سرعت خطی و دورانی ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر جریان مواد اتصال T شکل آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، (۱)۵۰، ۸-۱. doi: 10.22034/jmeut.2020.9558
- [۲۴] قصاب زاده چرندابی، امیر. ابراهیمی، محمود. اسحق اسکوئی، ابوذر. زادشکویان، محمد. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر رفتار شکست آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ تحت بارگذاری برشی خالص. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، (۲)۵۳، ۱۴۷-۱۵۴. doi: 10.22034/jmeut.2023.55286.3232