

بررسی تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر رفتار شکست آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ تحت بارگذاری برشی خالص

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران،
amir.gassabzade@gmail.com

امیر قصابزاده چرندابلی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران،
ebrahimi@maragheh.ac.ir

محمود ابراهیمی*

محقق پسادکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه علم و صنعت جنوب، شنزن، چین،
aeoskui@ut.ac.ir

ابوذر اسحقی اسکویی

دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،
zadshakoyan@tabrizu.ac.ir

محمد زادشکویان

چکیده

فرایند اصطکاکی-اغتشاشی به دلیل خواص منحصر به فردش، در صنایع مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این راستا، درک بهتر خواص مواد و قطعات حاصل شده از این روش، امکان استفاده گسترده‌تر از آن را فراهم خواهد نمود. یکی از مهم‌ترین خواصی که قبل از استفاده از هر ماده‌ای باید به‌خوبی از آن اطلاع داشت، رفتار ماده در حضور ترک است. رشد ترک تحت بارگذاری برشی در قطعات از مهم‌ترین عوامل شکست سازه‌ها می‌باشد که در صورت شناخت رفتار ماده در حضور ترک، بعد از عملیات اصطکاکی-اغتشاشی، امکان استفاده ایمن از آن فراهم می‌شود. در این تحقیق به بررسی تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر خواص مکانیکی و مقاومت ماده در برابر رشد ترک تحت بار برشی خالص پرداخته شده است. مشاهده گردید که این فرایند باعث افزایش چشمگیر استحکام و در عین حال قابلیت شکل‌پذیری ماده می‌گردد به طوری که مقادیر استحکام تسلیم، استحکام نهایی و حداکثر کرنش در اثر این فرایند نسبت به حالت اولیه به ترتیب حدود ۴۲٪، ۶۷٪ و ۱۲۵٪ افزایش می‌یابد. همچنین فهمیده شد که نمونه فرآوری شده نسبت به نمونه اولیه به‌طور متوسط در حدود ۲۳٪ دچار افت استحکام در برابر رشد ترک می‌گردد. به نظر می‌رسد که در اثر اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی، به‌طور قابل توجهی بر مقدار سطوح شکسته شده به‌صورت ترد افزوده شده است که همین امر موجب کاهش مقادیر پارامتر بحرانی شکست بوده است.

واژه‌های کلیدی: چقرمگی شکست، مکانیک شکست الاستیک خطی، گیره آرکان، مود II، تحلیل ترک.

Investigating the Friction Stir Processing Effect on the Fracture Behavior of 6061 Aluminum Alloy under Pure Shear Loading

A. Ghasabzadeh Charandabi

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

M. Ebrahimi

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

A. Es'haghi Oskui

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

M. Zadshakoyan

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

Abstract

Friction stir processing (FSP) is utilized in various industries due to its unique properties. In this regard, a better insight into the material properties obtained from this method will facilitate a broader application. One of the most important properties that should be well renowned before any use is how a material behaves when it has cracks. Crack growth under shear loading is one of the most significant factors in component failure, and if the material behavior after the FSP method in the presence of cracks is known, it is possible to use it safely. In this research, the influence of the FSP on the mechanical properties and resistance of the material against crack growth under pure shear loading has been investigated. It was found that this process significantly increases the strength and ductility so that the yield strength, ultimate tensile strength, and elongation-to-failure improve by about 42%, 67%, and 125%, respectively, compared to the initial state. It was also understood that the processed sample demonstrates an average drop of 23% in strength against crack growth compared to the initial state. It seems that due to FSP application, the amount of brittle fractured surfaces has been substantially increased, causing a decrease in the critical fracture parameter values.

Keywords: Fracture toughness; Linear elastic fracture mechanics; Arcan fixture; Mode II, Crack analysis.

تصادفی مرز دانه‌ها، تنها بخشی از خواص منحصر به فرد روش

۱- مقدمه

سادگی فرایند و عدم نیاز به ابزارآلات پیچیده، دستیابی به ساختارهای ریز، اختلاط مکانیکی لایه‌های مختلف، جهت‌گیری

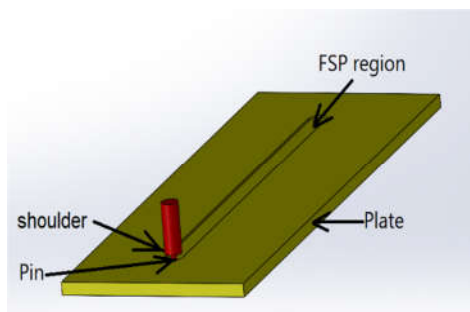
* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ebrahimi@maragheh.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲

اصطکاکی-اغتشاشی^۱ می‌باشد. این فرایند که در سال ۱۹۹۱ میلادی ابداع گردید برای اولین بار بر روی آلیاژهای آلومینیوم اعمال شد [۱]. این فرایند دارای راندمان انرژی بالا، میزان آلاینده‌گی پایین و انعطاف‌پذیری بالاست [۲]. لذا مزایای ویژه این فرایند سبب استفاده گسترده از آن در صنعت شده است، به‌گونه‌ای که پس از معرفی این روش به‌عنوان فرایند تولیدی آلیاژهای سبک، از جمله آلیاژهای آلومینیوم، نسبت تقاضا به عرضه محصولات پایه همانند ورق و شمش افزایش یافت و حتی منجر به افزایش قیمت آلومینیوم نیز گردید. اساس فرایند اصطکاکی اغتشاشی ساده است: یک ابزار غیرمصرفی با شکل خاص و سرعت چرخش بالا وارد درز اتصال می‌شود. در اثر چرخش ابزار، حرارت اصطکاکی جهت انجام فرایند اتصال‌دهی تأمین می‌گردد که در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد. این فرایند که یک تکنیک حالت جامد برای اصلاح ریزساختار است، با یک ابزار دوار مصرف‌نشده به فصل مشترک بین دو صفحه فرورفته تا اتصال ایجاد شده و در امتداد خط اتصال حرکت می‌کند. حرارت موضعی از طریق اصطکاک بین ابزار دوار و نمونه ایجاد می‌شود که دمای موضعی ماده را تا محدوده‌ای که بتواند آن را دچار تغییر شکل پلاستیک نماید، افزایش می‌دهد. اخیراً، فرایند اغتشاشی اصطکاکی، به‌عنوان تکنیکی نو برای تولید کامپوزیت‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است [۳]. همچنین فرایند اغتشاشی-اصطکاکی، به‌عنوان روشی نو برای ایجاد موادی با ساختار دانه‌های فوق‌ریز و حتی نانوساختار^۲ مورد استفاده قرار گرفته است. با افزایش دمای نمونه تا ۰/۶-۰/۷ دمای ذوب، تشکیل دانه‌های ریز از طریق تبلور مجدد دینامیکی^۳ و یا بازیابی دینامیکی^۴ میسر می‌شود [۴]. از نقطه نظر ترمومکانیکال، پارامترهایی همچون نرخ کرنش، دما، کرنش و فعل و انفعالات آن‌ها نقش حیاتی در ریزدانه‌سازی ساختار حین فرایند اغتشاشی-اصطکاکی ایفا می‌کنند. از طرف دیگر، گرمای اصطکاکی ایجاد شده و نرخ کرنش اعمالی مستقیماً به فاکتورهای دیگری نظیر هندسه ابزار، عمق فرورودگی، زاویه ابزار، نسبت قطر ابزار به بین، اندازه‌های ابزار و بین و ... بستگی دارد؛ بنابراین برای دستیابی به مطلوب‌ترین ساختار ممکن، پارامترهای فرایند بایستی به دقت کنترل شوند. در مقایسه با فرایندهای تغییر شکل سنتی همچون نورد، فورجینگ، اکستروژن، این روش، تکنیکی با پیچیدگی‌های بیشتری است، چراکه شبیهی تند از نظر دما و نرخ کرنش در ناحیه اغتشاشی شده و نواحی اطراف وجود دارد [۵]. به همین دلیل نیاز به بررسی دقیق‌تر این فرایند احساس می‌شود تا با شناخت دقیق رفتار آن، امکان استفاده گسترده‌تر از آن فراهم گردد [۶].

پریا و همکاران، فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 با هدف استفاده از آن در کاربردهای بیومکانیکی انجام گرفته است [۸]. کومار و همکاران به بررسی تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی چند گذره بر برخی خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم پرداخته‌اند [۹]. در این تحقیق، تمرکز اصلی بر بررسی خواص ریزساختاری ماده حاصل شده و عیوب موجود در آن بوده است. لذا، در سال‌های اخیر این فرایند از جذابیت زیادی در بین محققان برخوردار بوده و در تحقیقات مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. نکته جالب‌توجه اینکه تمامی تحقیقات فوق‌الذکر مربوط به سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ بوده‌اند که نشان‌دهنده میزان جذابیت این موضوع می‌باشد. همچنین مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در تمامی مقالات ذکرشده، خواص مکانیکی ماده پس از انجام فرایند اصطکاکی-اغتشاشی مدنظر بوده است و لذا مطالعات محدودی به بررسی رفتار شکست مواد فرآوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی پرداخته است. در تحقیق مشابه دیگری، به بررسی سطوح شکست، عوامل ریزساختاری شکست و تحلیل نقش صفحات لغزشی نمونه حاصل از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی پرداخته شده است [۱۰]. همچنین، زین و همکاران به مطالعه رفتار مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ91 پس از اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی پرداخته است [۱۱]. همچنین راجا و همکارانش به بررسی تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر رفتار کشش و شکست آلیاژ منیزیم AZ91 پرداخته‌اند [۱۲].



شکل ۱- شماتیک فرایند اصطکاکی-اغتشاشی.

به‌طور واضح، با بررسی تحقیقات فوق و تعداد کثیری از تحقیقات دیگر، مشاهده می‌شود که عموماً از دید علم مواد به مسئله پرداخته شده و رفتار شکست مواد، پس از انجام فرایند شکل‌دهی اصطکاکی-اغتشاشی، تنها به انجام تست کشش و بررسی سطوح شکست و همچنین تحلیل ریزساختار محدود شده است [۱۳]. با بررسی منابع مختلف، تحقیقی یافت نشد که در آن تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر پارامترهای شکست گزارش شده باشد و به‌عنوان مثال، تأثیر آن بر مقادیر چقرمگی شکست ارائه گردیده باشد. این درحالیست که گزارشی کمی از میزان تغییر ایجاد شده بر مقاومت ماده در برابر رشد ترک به توسط این فرایند، می‌تواند در تصمیمات طراحان تأثیرگذار باشد. لذا نویسندگان این پژوهش بر این باورند که بررسی تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر رفتار شکست مود دوم بارگذاری یا همان مود برشی می‌تواند بسیار مفید باشد. در این تحقیق که بر مبنای آزمایش-های تجربی طراحی شده است، فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر روی آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ که دارای کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف می‌باشد انجام شد. لازم به ذکر است که این آلیاژ در صنایع

در سال‌های اخیر محققان بسیاری تغییرات خواص آلیاژهای مختلف را بعد از این فرایند گزارش کرده‌اند. در تحقیقی که در سال ۲۰۲۲ انجام شده، کامپوزیت ورقه‌ای تحت فرایند اصطکاکی-اغتشاشی قرار گرفته و میزان بهبود خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. نتیجه شد که اعمال این فرایند تا ۴ گذر، باعث افزایش استحکام ماده تا ۵۳٪ می‌شود. در تحقیق دیگری در سال ۲۰۲۱ توسط

^۱ Friction stir processing (FSP)

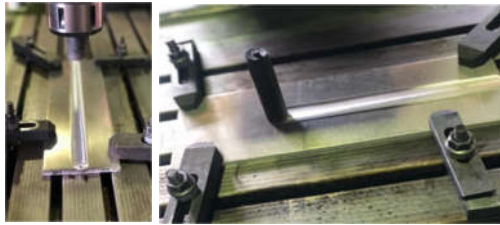
^۲ Nanostructure (NS)

^۳ Dynamic recrystallization (DRX)

^۴ Dynamic recovery (DR)

۶ میلی‌متر تهیه شد. سپس، نمونه‌هایی در ابعاد 100×300 میلی‌متر بریده و آماده گردید. لازم به ذکر است که ابعاد انتخاب‌شده با توجه به امکانات موجود برای انجام فرایند و همچنین ابعاد نمونه‌های آزمایش انتخاب شده است. برای حذف اثر عملیات حرارتی پیشین، نمونه‌ها قبل از اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی تحت عملیات بازپخت قرار گرفت تا به نرم‌ترین حالت ممکن برسند.

برای اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی، از قیدوبند مناسب جهت مهار نمونه‌ها استفاده شد. برای دستیابی به ناحیه‌ای اصطکاکی-اغتشاشی بی‌نقص، لازم هست که ابزار با ابعاد مشخص، سرعت دورانی و پیشروی معینی حرکت کند. با توجه به تجربیات پیشین و روش سعی و خطا، ابزار مورد استفاده برای این فرایند، به قطر شانه ۲۰ میلی‌متر، قطر پین ۵ میلی‌متر و ارتفاع پین ۴/۵ میلی‌متر انتخاب شد و سرعت دورانی و پیشروی آن به ترتیب برابر با ۱۲۵۰ دوربر دقیقه و ۳۰ میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است گرچه در مراجع مختلف اعداد و ارقام مختلفی گزارش شده است ولی مبنای این اعداد بیشتر تجربی می‌باشد و با سعی و خطا به دست آمده است. لازم به ذکر است که تنها یک پاس فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است. نمونه‌ای از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر روی آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در حین انجام در شکل ۲ ارائه گردیده است.



شکل ۲- اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر روی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱

پس از تهیه نمونه‌های فراوری شده با روش اصطکاکی-اغتشاشی، نمونه‌های کشش و شکست تهیه شدند. برای این کار، نحوه و موقعیت جداسازی نمونه‌ها از ورق، در شکل ۳ نمایش داده شده است. برای آماده‌سازی نمونه‌ها از دستگاه وایرکات^۱ استفاده گردید. برای مقایسه میزان تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر استحکام و مقاومت ماده در مقابل رشد ترک، نمونه‌های اولیه نیز تهیه شدند. ابعاد نمونه‌های دمبلی و پروانه‌ای مورد استفاده، در شکل ۴ قابل مشاهده است. این نمونه و گیره مورد استفاده، قابلیت ایجاد تمامی مودهای داخل صفحه (از مود یک خالص تا مود دوی خالص) را دارا می‌باشند. همچنین هندسه خاص آن به گونه‌ای است می‌توان اطمینان حاصل کرد که شرایط مرزی، به اندازه کافی دور از میدان نوک ترک می‌باشد. بایستی اشاره شود که نمونه پروانه‌ای استفاده شده، هنوز استاندارد نشده ولی هندسه رایج آن در تحقیقات متعددی استفاده شده است. به عنوان مثال، در تحقیقاتی در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۲، هندسه پروانه‌ای مبنای آزمایش‌های تجربی بوده است [۱۶ و ۱۷]. با این حال، نمونه دمبلی‌شکل مطابق استاندارد [۱۸] تهیه شده است.

هوایی، دفاعی، خودروسازی، ساخت بدنه دوچرخه، قایق موتوری و ... کاربرد گسترده‌ای دارد. از ویژگی‌های آن می‌توان به شکل‌پذیری بالا، جوش‌پذیری، مقاومت به خوردگی بالا و چقرمگی خوب اشاره نمود. در این تحقیق، با توجه به کاربردهای گسترده آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱، این آلیاژ به‌عنوان ماده مورد بررسی انتخاب گردید. سپس نمونه‌های شکست از ماده فراوری شده و ماده اولیه تهیه شده و آزمایش‌های شکست تحت بارگذاری برشی انجام گردیده و نتایج مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲- مروری بر مکانیک شکست الاستیک خطی

مکانیک شکست الاستیک خطی^۱ ابزار مفیدی برای تحقیق در مورد ترک‌ها می‌باشد. هدف از آزمایش چقرمگی شکست، به دست آوردن مقدار ضرایب شدت تنش بحرانی یا چقرمگی شکست در حالت کرنش صفحه‌ای است. این خصوصیت ماده برای توصیف مقاومت آن در مقابل شکست در طراحی اعضای سازه‌ای به کار می‌رود. استانداردهای ASTM با عنوان‌های E399 و D5045 برخی راهنمایی‌ها را درباره نحوه دستیابی به چقرمگی شکست مود کششی در حالت کرنش صفحه‌ای برای فلزات و پلاستیک‌ها ارائه می‌دهند. در این رابطه، ضریب شدت تنش در رأس یک ترک برای یک نمونه کششی پیوسته از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۴ و ۱۵]:

$$K_{IC} = \frac{P_C \sqrt{\pi a}}{wt} f(a/w) \quad (1)$$

که P_C بار بحرانی شکست، w عرض نمونه، t ضخامت نمونه، a طول ترک می‌باشند که در شکل ۴ قابل مشاهده هستند؛ همچنین $f(a/w)$ ضریب شدت تنش بی‌بعد یا ضریب اصلاح هندسی است و از تحلیل المان محدود نمونه حاصل می‌شود. چنان‌که از اسم آن قابل استنباط است، این پارامتر در برگزیده اثر هندسه نمونه بوده (که شامل طول ترک و زاویه بارگذاری هم می‌شود) و مستقل از ماده و میزان بارگذاری می‌باشد، به همین دلیل نیازی به محاسبه دوباره آن نمی‌باشد و از تحقیقات قبلی قابل استفاده است [۱۷]. لازم به ذکر است، که مکانیک شکست الاستیک خطی و شرایط کرنش صفحه‌ای، شرایط اولیه لازم هستند [۱۷]. ضرایب شدت تنش در جلوی رأس ترک برای یک نوع اصلاح‌شده نمونه آرکان با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [17]:

$$K_{IC} = \frac{P_C \sqrt{\pi a}}{wt} f_I(a/w) \quad (2)$$

به طریق مشابه K_{IC} نیز با استفاده از ضریب شدت تنش $f_{II}(a/w)$ محاسبه می‌شود.

۳- روش تحقیق

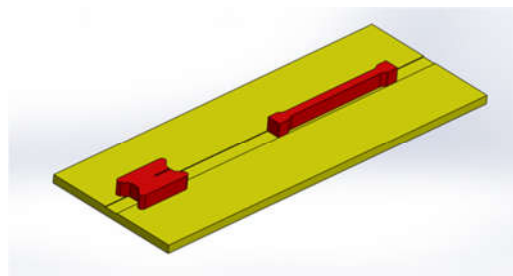
برای این تحقیق، آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ بصورت ورق با ضخامت

^۱ Wire-cut machine

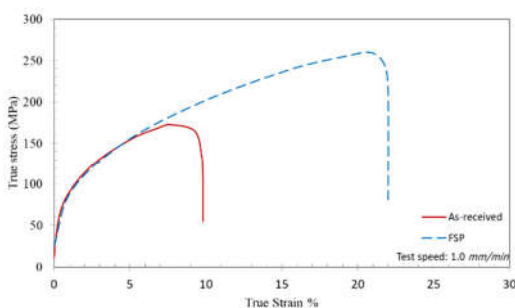
^۱ Linear elastic fracture mechanics (LEFM)



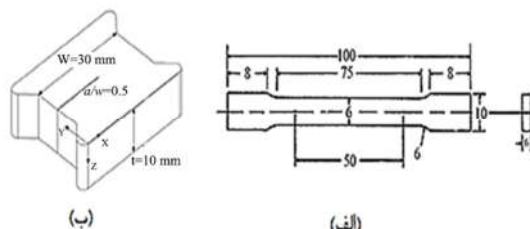
شکل ۵- نمایی از آزمون کشش نمونه دمبلی تهیه شده از آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱.



شکل ۳- نحوه و موقعیت جداسازی نمونه‌ها از ورق.



شکل ۶- منحنی تنش- کرنش حقیقی از نمونه‌های دمبلی شکل آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در دو حالت اولیه و فراوری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی.



شکل ۴- ابعاد نمونه الف) دمبلی (برحسب mm)، ب) پروانه‌ای [۱۷].

۳-۱- آزمایش کشش ساده

می‌دانیم که پیش‌نیاز آزمون شکست، استخراج خواص مکانیکی ماده مورد بررسی است. برای این منظور، دو نمونه در حالت اولیه و فراوری شده تهیه گردید. آزمایش کشش ساده در دستگاه کشش ستام ۲۵ تنی انجام گرفت. در حین انجام آزمایش، تمامی ملزومات ASTM E8/E8M رعایت شد و طبق دستورالعمل‌های آن آزمون‌ها انجام گرفت [۱۹]. لازم به ذکر است که آزمون‌ها به صورت نرخ ثابت جابجایی انجام شد. سرعت کشش برابر یک میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد تا اثرات دینامیکی تا حد امکان حذف گردد. هر آزمایش حداقل پنج بار تکرار شد تا از خطاهای احتمالی اجتناب شود. در این رابطه، نمایی از آزمون کشش در شکل ۵ نمایش داده شده است. همچنین، نمونه‌ای از منحنی تنش-کرنش حقیقی از نمونه‌های اولیه و فراوری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی در شکل ۵ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود منحنی ممتد مربوط به حالت خام اولیه و منحنی خط‌چین مربوط به نمونه فراوری شده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر استحکام تسلیم، استحکام نهایی و حداکثر تغییر شکل، با اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی افزایش قابل‌توجهی دارد که در جدول ۱ بیان شده است. با بررسی دقیق‌تر در جدول ۱ معلوم می‌شود که استحکام تسلیم برای نمونه فراوری شده نسبت به نمونه اولیه به مقدار ۴۲٪ افزایش نشان می‌دهد. همچنین مقادیر افزایش‌یافته برای استحکام نهایی و حداکثر کرنش به ترتیب برابر ۶۷٪ و ۱۲۵٪ می‌باشد. لذا تأثیر فرایند مذکور بسیار قابل‌توجه بوده و علاوه بر افزایش استحکام ماده، باعث افزایش چشمگیر قابلیت تغییرشکل آن نیز شده است. این نتیجه دور از انتظار نبود، چرا که با انجام این فرایند تغییرشکل، چگالی نایبایی‌ها و مرزدهانه‌ها افزایش می‌یابد.

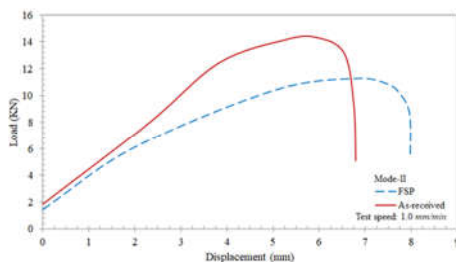
جدول ۱- نتایج خواص مکانیکی حاصل‌شده از آزمون کشش استاندارد.

خواص مکانیکی	آزمون	نمونه اولیه	نمونه فراوری شده
استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	۱	۸۱	۱۱۷
	۲	۸۳	۱۲۴
	۳	۸۸	۱۱۶
	Avg.	۸۴	۱۱۹
استحکام نهایی (مگاپاسکال)	۱	۱۴۹	۲۶۳
	۲	۱۵۵	۲۶۰
	۳	۱۶۴	۲۵۷
	Avg.	۱۵۶	۲۶۰
حداکثر کرنش (%)	۱	۱۰/۲	۲۳/۱
	۲	۹/۷	۲۲/۴
	۳	۹/۵	۲۰/۲
	Avg.	۹/۸	۲۱/۹
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)		۶۹	



شکل ۸- آزمون تجربی شکست نمونه پروانه‌ای تحت مود II خالص برای نمونه‌های اولیه و فرآوری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی.

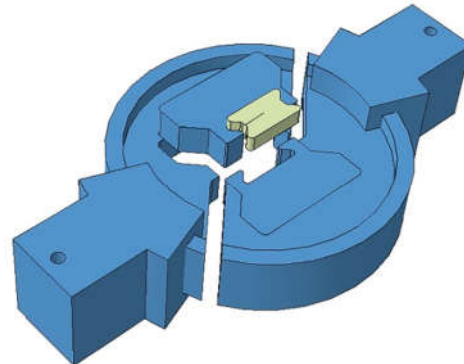
همچنین در شکل ۹ نتایج آزمون شکست برای نمونه‌های اولیه و فرآوری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی برای هندسه پروانه‌ای شکل تحت مود II خالص نمایش داده است. چنانکه اشاره شد هر آزمون حداقل ۳ بار تکرار شده و مقادیر میانگین مبنای محاسبات بوده‌اند. چنان‌که مشاهده می‌شود، نمونه‌ای که روی آن فرایند اصطکاکی-اغتشاشی انجام شده است، زودتر از نمونه اولیه دچار شکست شده و در واقع مقاومت آن در مقابل رشد ترک کمتر بوده است که می‌تواند به دلایل مختلفی مثل وجود حفره^۱ در نمونه فرآوری شده باشد، چراکه به وجود آمدن چنین حفراتی، یکی از مشکلات رایج برای این روش می‌باشد. مقادیر دقیق حداکثر نیروی تجربه شده در هر آزمون و همچنین مقادیر میانگین حداکثر بار قابل تحمل قبل شروع رشد ترک در جدول ۲ آورده شده است. بر این اساس مشاهده می‌شود که نتایج از تکرارپذیری مطلوبی برخوردار می‌باشد. با مقایسه مقادیر میانگین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار افت نیرو برای نمونه فرآوری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی نسبت به نمونه اولیه حدوداً ۲۲٪ است. این تکرار پذیری نشان از کیفیت قابل قبول فرایند انجام شده روی نمونه دارد؛ برای بررسی بهتر این ادعا، نویسندگان بر آن شدند تا سطوح شکست رو مورد بررسی بیشتر قرار دهند که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته شده است.



شکل ۹- نتایج آزمون تجربی شکست با هندسه پروانه‌ای شکل تحت مود II خالص برای نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی اولیه و فرآوری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی.

۳-۲- وسیله آزمایش

همواره آزمایش مود II شکست یا بارگذاری برشی خالص با دشواری‌هایی همراه بوده است. برای این منظور، گیره آرکان و نسخه-های اصلاح‌شده آن، توانایی بالایی در ایجاد این مود بارگذاری دارند. به همین دلیل در این تحقیق، از یک نسخه اصلاح‌شده گیره آرکان که مطابق شکل ۷، حالت بارگذاری مود II آن نمایش داده شده استفاده شده است [۲۰].



شکل ۷- تصویر شماتیک گیره آرکان جدید طراحی شده برای این

مطالعه.

۳-۳- آزمون شکست

پس از انجام آزمون کشش استاندارد و مشخص شدن خواص مکانیکی نمونه مورد مطالعه در حالات اولیه و فرآوری شده، تأثیر این فرایند بر مقاومت ماده در برابر رشد ترک یا اصطلاحاً خواص شکست ماده تحت بارگذاری برشی مورد بررسی قرار گرفت. هر آزمایش حداقل سه بار تکرار شد و نرخ کشش فک بالایی برابر یک میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد تا بتوان از تأثیر دینامیکی نوک ترک صرف‌نظر کرده و مسئله را استاتیکی در نظر گرفت. در حین بارگذاری، نمونه ابتدا در مقابل رشد ترک مقاومت می‌کرد؛ پس از افزایش بار، نوک ترک تا حدودی شروع به رشد کرده که در منحنی حاصل شده معادل نقطه بیشینه می‌باشد و در واقع پس از آن مرحله آسیب شروع می‌شود که در واقع استحکام ماده در حال کاهش بوده و ترک رشد می‌کند. توجه شود که در این تحقیق، هدف شناسایی لحظه شروع رشد ترک می‌باشد که طبق آنچه قبلاً اشاره شد، با خاصیت چقرمگی شکست بیان می‌شود. در شکل ۸ نمایشی از آزمون تجربی شکست نمونه پروانه‌ای تحت بارگذاری مود II خالص یا مود برشی نمایش داده شده است. این آزمون‌ها برای ماده خام نیز انجام شد تا تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر مقاومت ماده در برابر رشد ترک تحت بارگذاری برشی مشخص شود.

^۱ Void

جدول ۲- مقادیر حداکثر بار قابل تحمل قبل از شروع رشد ترک حاصل شده از آزمون شکست برحسب کیلونیوتن.

نمونه فرآوری شده	نمونه اولیه	آزمون
۱۱/۳	۱۳/۹	۱
۱۱/۵	۱۴/۷	۲
۱۱	۱۴/۴	۳
۱۱/۲	۱۴/۳	مقدار میانگین
۰/۲۲۶	۰/۳۴۴	انحراف معیار

۴- نتایج و بحث

۴-۱- پارامترهای شکست بحرانی

در بخش قبل، خواص مکانیکی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در حالات قبل و بعد از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی استخراج گردید. همچنین، حداکثر نیروی قابل تحمل در نمونه‌های اولیه و فرآوری شده به‌دست آمد. در ادامه، مقادیر این نیروها جهت محاسبه پارامترهای بحرانی شکست مورد استفاده قرار گرفته است که بیانگر میزان مقاومت ماده در برابر رشد ترک می‌باشد. با استفاده از ضرایب شدت تنش بی-بعد موجود در مراجع و نیروهای بحرانی حاصل شده از آزمون شکست، مقادیر ضرایب شدت تنش بحرانی تحت زوایای بارگذاری مختلف برای نمونه‌های اولیه و فرآوری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی قابل محاسبه می‌باشد [۲۲]. در مرجع مذکور [۲۲]، مقدار ضریب شدت تنش بی‌بعد تحت مود II بارگذاری برابر با 0.52 گزارش شده است. با جایگذاری مقدار ضریب شدت تنش بی‌بعد و مقادیر میانگین نیروهای بحرانی حاصل شده از آزمون‌های تجربی (جدداً برای نمونه اولیه و فرآوری شده) می‌توان به مقادیر ضرایب شدت تنش بحرانی مود I و II دست یافت. در واقع کفایت که با جایگزینی مقادیر پارامترهای مختلف در رابطه ۱، مقدار ضریب شدت تنش بحرانی محاسبه گردد. مقدار نیروی بحرانی حاصل شده از آزمون‌های تجربی، ضریب شدت تنش بی‌بعد مستخرج از تحلیل المان محدود و بقیه پارامترها، مقادیر هندسی می‌باشند. مقادیر ضرایب تنش بحرانی برای نمونه اولیه و فرآوری شده در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقادیر میانگین این پارامتر برای نمونه اولیه و فرآوری شده به ترتیب برابر $5/17 \text{ MPa.m}^{1/2}$ و $4/05 \text{ MPa.m}^{1/2}$ به دست آمد. نکته جالب توجه اینکه، با اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی، علیرغم افزایش استحکام تسلیم و کششی، مقاومت ماده در برابر رشد ترک دچار 22% کاهش شده است. شاید در ابتدا این نتیجه غیرمنطقی به نظر برسد، چرا که با بسیاری از تحقیقات پیشین (البته روی مواد دیگر) در تناقض است؛ اما بایستی توجه شود که افزایش استحکام دلیل بر افزایش مقاومت ماده در برابر رشد ترک نخواهد بود و نباید این دو موضوع را لزوماً وابسته به هم دانست. لذا این نتیجه مهم حاصل می‌شود که علیرغم افزایش استحکام ماده و بهبود خواص مکانیکی عمومی آن تحت اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی، مقاومت ماده در برابر رشد ترک کاهش می‌یابد. این رفتار می‌تواند از عوامل مختلفی مانند به وجود آمدن حفره‌هایی در حین فرایند اصطکاکی-اغتشاشی و یا عدم توزیع مناسب آن و یا به

دلیل عوامل ریزساختاری مثل افزایش بیش از اندازه چگالی نایبایی‌ها اتفاق افتاده باشد. بایستی توجه شود که میزان مقاومت ماده در برابر رشد ترک، به دو عامل استحکام ماده و همچنین میزان قابلیت شکل-پذیری (و به نوعی چقرمگی) آن بستگی دارد. درست است که در این فرایند شکل‌دهی، استحکام ماده فرآوری شده افزایش یافته است، ولی واضح است که میزان شکل‌پذیری آن، به واسطه فرایند شکل‌دهی انجام شده روی آن، کاهش یافته است و در مجموع، در رابطه با این ماده خاص، تاثیر عامل دوم بیشتر از عامل اول بوده است. نکته حائز اهمیت این‌که مقاومت ماده فرآوری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی در برابر رشد ترک، تحت بارگذاری مود برشی نسبت به نمونه اولیه آن دچار کاهش قابل‌توجه شده است. لذا در طراحی قطعاتی که تحت بارگذاری برشی هستند، بایستی در استفاده از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی محتاط عمل نمود.

جدول ۳- مقادیر ضرایب شدت تنش بحرانی آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در حالات قبل و بعد از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی برحسب $\text{MPa.m}^{1/2}$

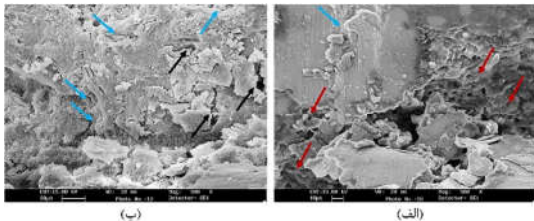
نمونه فرآوری شده	نمونه اولیه	آزمون
۴/۰۷	۵/۰۱	۱
۴/۱۵	۵/۳۱	۲
۳/۹۵	۵/۱۸	۳
۴/۰۵	۵/۱۷	مقدار میانگین
۰/۰۸۲	۰/۱۲۳	انحراف معیار

در بسیاری از تحقیقات، از دیدگاه انرژی به بحث مکانیک شکست نگریسته شده است. به عنوان مثال، برخی از نظریه‌های مکانیک شکست مانند کار ضروری شکست و انتگرال جی^۱ به گزارش مقدار انرژی لازم برای شروع رشد ترک پرداخته شده است. بر این اساس، نویسندگان بر آن شدند تا در این بخش، از رهیافت انرژی به موضوع نگریسته و مقادیر انرژی موردنیاز برای رشد ترک را بررسی نمایند تا امکان مقایسه خروجی این تحقیق با پژوهش‌های قبلی تسهیل گردد. رابطه بین انرژی و رشد ترک، برای اولین بار توسط گریفیث^۲ با استفاده از قانون اول ترمودینامیک و بر اساس یک تعادل ساده انرژی پایه‌گذاری شد. بر طبق این نظریه، شرط ناپایداری در رشد ترک و شکست در یک جسم، آن است که تغییر در انرژی کرنشی حاصل از رشد ترک برای غلبه بر انرژی سطحی ماده کافی باشد. همچنین باید موازنه‌ای بین کاهش انرژی پتانسیل (مربوط به آزاد شدن انرژی الاستیک خطی ذخیره‌شده و کار انجام شده بر اثر حرکت نیروهای خارجی) و افزایش انرژی سطحی ناشی از حضور ترک برقرار شود. اگر سیستم انرژی، سطحی اضافی را تأمین کند ترک موجود رشد می‌کند. در رابطه با نظریه مکانیک شکست الاستیک خطی، امکان ارتباط ضرایب شدت تنش و مقادیر انرژی وجود دارد. رابطه زیر برای این منظور، برای هر مود بارگذاری دلخواه قابل استفاده است:

^۱ Integral-J

^۲ Griffith

در سطوح شکست مشاهده می‌شود که بیانگر رفتار شکل‌پذیر قابل توجه در این نواحی است. نمونه‌ای از این نواحی با پیکان قرمز مشخص شده است. با این‌که ترکیبی از شکافتگی‌ها و دیمپل‌ها باعث شکست در نمونه‌ها شده‌اند اما واضح است که شکافتگی، مکانیزم شکست غالب در هر دو نمونه بوده است و البته احتمال دارد که شکافتگی‌های بزرگ از به‌هم‌پیوستگی^۵ دیمپل‌های ریز حاصل شده باشند. علاوه بر آن، تعدادی ریزترک^۶ یا ترک ثانویه^۷ نیز در سطوح شکافتگی‌ها مشاهده می‌شود که در راستای عمود بر سطح، رشد کرده‌اند. این پدیده به دلیل افزایش بسیار زیاد تمرکز تنش در سطوح بوده که باعث شروع رشد ترک، حتی در جهتی عمود بر ترک اصلی شده است. چند نمونه از این ریزترک‌ها با پیکان‌های مشکی در شکل مشخص شده است. چنانکه مشاهده می‌شود در نمونه اولیه، سطوحی از شکافتگی‌ها و دیمپل‌ها با ابعاد بزرگ وجود دارند ولی در نمونه فرآوری شده، سطوح بسیار کوچک‌تر شده‌اند و نکته قابل توجه اینکه مقدار دیمپل‌ها در اکثر موارد به طرز چشمگیری کاهش یافته است و بر سطوح شکافتگی‌ها افزوده شده است؛ همچنین اندازه دیمپل‌ها نیز کوچک‌تر شده‌اند.



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپی از سطوح شکست نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ آزمایش شده تحت شرایط مود II خالص برای (الف) نمونه اولیه و (ب) نمونه فرآوری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی. توجه شود که پیکان‌های آبی، قرمز، و مشکی، به ترتیب بیانگر نمونه‌ای از نواحی شکافتگی، شکل‌پذیر و ریز ترک می‌باشد.

با بررسی تصاویر تهیه شده از ناحیه شکست در کنار نتایج آزمون شکست می‌توان نتایج حاصل شده از این تحقیق را به درستی تحلیل نمود. چنان‌که در درس کلاسیک مربوط به مکانیک شکست ذکر شده است، دو عامل اصلی یعنی استحکام و چقرمگی، تعیین‌کننده میزان مقاومت ماده در برابر رشد ترک می‌باشند. در مسئله بررسی شده در این تحقیق، مشاهده شد که استحکام نمونه در اثر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی افزایش یافته است، این در حالی است که در بخش شکست-نگاری نتیجه‌گیری شد که در اثر فرایند مذکور، چقرمگی ماده به میزان زیادی کاسته شده و رفتار ماده تردتر شده است. نهایتاً نتایج آزمون‌های شکست نشان می‌دهد که برآیند تغییر این دو پارامتر، منجر به کاهش پارامترهای بحرانی شکست می‌شود و به همین دلیل، توجه ویژه طراحان را در استفاده از قطعات آماده شده به روش فرایند اصطکاکی-اغتشاشی تحت بارگذاری برشی می‌طلبد. لذا در مواردی که قطعه‌کار تحت بارگذاری برشی قرار خواهد گرفت، بایستی در استفاده از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی محتاط عمل نمود.

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (۳)$$

که در رابطه فوق، E مدول یانگ و G نرخ رهایی انرژی کرنشی، و K ضریب شدت تنش می‌باشد. این رابطه به تفکیک برای مود I، II و III قابل استفاده است. لازم به ذکر است در این رابطه، در شرایط تنش صفحه‌ای $E' = E$ و در شرایط کرنش صفحه‌ای $E' = \frac{E}{(1-\nu^2)}$ است.

بر این اساس، به کمک رابطه فوق، مقادیر انرژی کرنشی مستخرج از آزمون‌های تجربی شکست، متناظر با ضرایب شدت تنش بحرانی میانگین، قابل محاسبه می‌باشد که برای نمونه اولیه و فرآوری شده تحت بارگذاری برشی خالص به ترتیب برابر ۳۴۹ J/m^2 و ۲۱۵ J/m^2 می‌باشد. با بررسی مقادیر انرژی لازم برای شروع رشد ترک، بهتر می‌توان این مقادیر را مقایسه نموده و تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی را مورد مطالعه قرار داد. نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در حالت آنیل اولیه مقاومت بیشتری در برابر رشد ترک نشان می‌دهد و مقاومت آن پس از اعمال فرایند، دچار افت ۳۹٪ شده است که می‌تواند به دلایل مذکور باشد. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، به بررسی تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از سطوح شکست آنها پرداخته شده است.

۲-۴- شکست نگاری

برای درک بهتر مکانیزم شکست پس از انجام آزمون‌های ذکر شده، تهیه تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ضروری می‌باشد. لذا تصاویر مختلفی از ناحیه شروع رشد ترک، بلافاصله بعد از پیش‌ترک با بزرگ‌نمایی‌های مختلف تهیه شد. بررسی این تصاویر، نمای دیگری از رفتار شکست ماده را در اختیار خواننده قرار می‌دهد.

در تصاویر بررسی شده در این پژوهش، سعی گردیده تا تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی در تقویت یا تضعیف مکانیزم‌های شکست مورد مطالعه قرار گیرد. در شکل ۱۰ تصاویری از نمونه آلومینیومی در حالات قبل و بعد از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی در زاویه بارگذاری مود II آورده شده است که در آن تأثیر فرایند مذکور بر ریزساختار ناحیه شکست قابل مشاهده است. بر این اساس، هر دو تصویر ترکیبی از مکانیزم‌های شکست ترد^۱ و شکل‌پذیر^۲ را در سطوح شکست نشان می‌دهد. مهم‌ترین مکانیزمی که در سطوح شکست به‌وضوح به چشم می‌خورد پدیده شکافتگی^۳ است که مکانیزم غالب بوده و تعدادی از آن‌ها با پیکان‌های آبی مشخص شده است. در واقع، تصاویر شامل تعداد زیادی از مناطق بزرگ شکافتگی است که بیانگر شکست ترد در آن نواحی می‌باشد. به‌وضوح مشاهده می‌شود که تعداد این نواحی در نمونه فرآوری شده به‌مراتب بیشتر از نمونه اولیه می‌باشد که همین نکته می‌تواند اصلی دلیل اصلی کاهش مقاومت ماده در برابر رشد ترک در نمونه فرآوری شده باشد. طبق توصیه‌های دایره‌المعارف ASM در رابطه با بررسی سطوح شکست، با مشاهده این صفحات شکافته شده می‌توان انتظار تغییر مسیر ترک را در حین رشد داشت. همچنین دیمپل^۴ نیز

^۱ Brittle

^۲ Ductile

^۳ Cleavage

^۴ Dimple

^۵ Coalescence

^۶ Micro crack

^۷ Secondary crack

۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق، بررسی میزان تأثیرگذاری فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر رفتار شکست آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ تحت بارگذاری برشی خالص بوده است. نکته‌ای که تاکنون، چنان‌که باید مورد توجه پژوهشگران قرار نگرفته بود. پس از اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی و آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمون‌های تجربی صورت گرفت. لذا میزان تغییر خواص مکانیکی با ساخت نمونه‌های دمبلی‌شکل از ماده اولیه و فرآوری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی و انجام آزمون کشش ساده استاندارد مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که استحکام تسلیم نمونه آلومینیومی در اثر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی نسبت به حالت اولیه به مقدار ۴۲٪ افزایش داشته است. همچنین مقادیر افزایش یافته برای استحکام نهایی و حداکثر کرنش به ترتیب برابر ۶۷٪ و ۱۲۵٪ می‌باشد. در ادامه نمونه‌های ترک‌دار پروانه‌ای شکل با هدف بررسی تأثیر فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر مقاومت ماده در برابر رشد ترک تهیه گردید. نکته جالب توجه اینکه، با اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی، علیرغم افزایش استحکام تسلیم و کششی، مقاومت ماده در برابر رشد ترک دچار ۲۲٪ کاهش شده است. شاید در ابتدا این نتیجه غیرمنطقی به نظر برسد، چرا که با بسیاری از تحقیقات پیشین (البته روی مواد دیگر) در تناقض است؛ اما بایستی توجه شود که افزایش استحکام دلیل بر افزایش مقاومت ماده در برابر رشد ترک نخواهد بود و نباید این دو موضوع را لزوماً وابسته به هم دانست. در ادامه تحقیق برای درک بهتر مکانیزم شکست و مشخص شدن تمامی جوانب موضوع، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح شکست تهیه شد. ترکیبی از مکانیزم‌های شکست ترد و شکل‌پذیر در سطوح شکست مشاهده شد. با این حال، در اثر اعمال فرایند اصطکاکی-اغتشاشی بر نمونه آلومینیومی، به‌طور قابل‌توجهی بر مقدار سطوح شکسته شده در اثر پدیده شکافتگی افزوده شده است و همین امر دلیل بر کاهش مقادیر پارامتر بحرانی شکست بوده است. لذا در صورت استفاده از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی در آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱، از بابت رشد ترک در آن بایستی محتاطانه عمل نمود.

۶- مراجع

- [6] *ASM METALS HANDBOOK*, Forming and Forging, ASM international, 1996.
- [7] Mazaheri Y., Malmir R., Jalilvand M. M., Sheikhi M., Heidarpour A., Mechanical Properties and Tribological Performance of A356/Cr3C2-NiCr Surface Composite Developed by High-velocity Oxy-fuel and Post Friction Stir Processing Treatment, *Surfaces and Interfaces*, Vol. 28, pp. 101627, 2022.
- [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*, Vol. 131, pp. 101016, 2023.
- [9] Kumar A., Gotawala N., Mishra S., Shrivastava A., Defects, Microstructure and Mechanical Behaviour upon Multi-pass Friction Stir Processing of Magnesium Alloy with Spiral Tool Path. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 32, pp. 170-178, 2021.
- [10] Xin R., Liu D., Li B., Sun L., Zhou Z., Liu Q., Mechanisms of Fracture and Inhomogeneous Deformation on Transverse Tensile Test of Friction-Stir-Processed AZ31 Mg Alloy, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 565, pp. 333-341, 2013.
- [11] Farshbaf Zinat R., Development of a Modified Friction Stir Process for Dispersion of Multi-Walled Carbon Nano-tube throughout Nylon 6. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp. 269-278, 2015.
- [12] Raja A., Pancholi V., Effect of Friction Stir Processing on Tensile and Fracture Behaviour of AZ91 Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 248, pp. 8-17, 2017.
- [13] Golafshani K. B., Nourouzi S., Aval H. J., Hot Tensile Deformation and Fracture Behavior of Friction Stir Processed Al-Si-Cu Alloy, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 35, pp. 41-52, 2021.
- [14] ASTM D5045-14, Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, *ASTM International, West Conshohocken PA*, 2014.
- [15] ASTM E399-12e3, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials, *ASTM International, West Conshohocken PA*, 2012.
- [16] Oskui A. E., Soltani N., Rajabi M., Schmauder S., Mixed-mode Fracture Behavior of AM60 Magnesium Alloy Using Two Parameter Fracture Mechanics, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 218, pp. 106566, 2019.
- [17] Hashemian S., Keshtiban P. M., Oskui A. E., Fracture Behavior of the Forged Aluminum 7075-T6 Alloy under Mixed-mode Loading Conditions, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 140, pp. 106610, 2022.
- [18] ASTM B557M-15, Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products (Metric), *ASTM International West Conshohocken PA*, 2015.
- [20] ASTM E8/E8M-13, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2008. *ASTM International, West Conshohocken PA*, 2013.
- [20] Oskui A. E., Haddadi E., Ebrahimi M., A Technical Approach toward Pre-crack Generation and its Effect on the Fracture Behavior of Polymeric Materials, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 274, pp. 108780, 2022.
- [21] Oskui A. E., Soltani N., Characterization of Elastic-plastic Fracture Toughness of AM60 Mg Alloy under Mixed-mode Loading Conditions, *Polymer Engineering Science*, Vol. 204, pp. 388-403, 2018.
- [22] Oskui A. E., 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*, Vol. 42, pp. 2354-2371, 2019.
- [1] Ebrahimi M., Par M. A., Twenty-year Uninterrupted Endeavor of Friction Stir Processing by Focusing on Copper and its Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 781, pp. 1074-1090, 2019.
- [۲] نوربخش، سیدحسن، فرهنگ کوپایی، امیرحسین، عطریان، امیر، و بت شکنان دهکردی، محسن. (۱۳۹۷). بررسی تأثیر خنک کاری های مختلف در فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۴۸ (پیاپی ۸۵)، ۳۰۷-۳۰۷. SID: <https://sid.ir/paper/269921/fa>
- [3] Zahmatkesh B., Enayati M. H., A Novel Approach for Development of Surface Nanocomposite by Friction Stir Processing, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 6734-6740, 2010.
- [4] Chabok A., Dehghani K., Formation of Nanograin in IF Steels by Friction Stir Processing, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 309-313, 2010.
- [5] Dehghani K., Chabok A., Dependence of Zener Parameter on the Nanograins Formed during Friction Stir Processing of Interstitial Free Steels, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 4325-4330, 2011.