E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 11, Number 2, 2026



An experimental study on surface groove repair in pure magnesium using surface friction stir processing

M. Karimi Dizaj Cheragh[1], M. Sajed[1], M. A. Saeimi Sadigh[1], A. Abyazi[2], A. Heidarzadeh[3*]

1- Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
2- Department of Materials Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
3-Department of Materials and Metallurgy, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Received 26 May 2025 ; Accepted 30 July 2025

Abstract

This study experimentally investigates the repair of surface grooves on pure magnesium samples using the surface friction stir processing (SFSP). Grooves with depths of 0.5, 1, and 1.5 mm were created and subsequently repaired under constant parameters of 1400 rpm rotational speed and 40 mm/min travel speed. The results revealed that the stir zone (SZ) exhibited fine equiaxed grains due to complete dynamic recrystallization, leading to significant improvements in tensile strength and hardness compared to the base metal. The highest ultimate tensile strength of 66.1 MPa and hardness of 60 HV were achieved in the 1 mm groove sample. Additionally, partial dynamic recrystallization was observed in the thermo-mechanically affected zone (TMAZ), and complete elimination of grooves was confirmed in all samples. These findings demonstrate that the SFSP is highly effective for localized repair and enhancement of mechanical properties in magnesium components, offering a promising solution to extend the service life of damaged magnesium parts.

Keywords: Surface friction stir processing, Repair, Magnesium, Microstructure.

*Corresponding Author: A. Heidarzadeh, a_heydarzadeh@sbu.ac.ir.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.01]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال یازدهم، شماره2، پاییز و زمستان 1404



مطالعه تجربی ترمیم شیارهای سطحی در منیزیم خالص به روش عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی

محمد کریمی دیزج چراغ[1]، موسی ساجد[1]، محمد علی صائیمی صدیق[1]، آرزو ابیضی[2]، اکبر حیدرزاده[3*]

1- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

2- گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

3- گروه مهندسی مواد، دانشکده مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1404/03/05 ؛ پذیرش مقاله: 1404/05/08

چکیده

در این مطالعه، ترمیم شیارهای سطحی ایجاد شده بر نمونه‌های منیزیم خالص با استفاده از عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی تجربی قرار گرفت. شیارهایی با عمق‌های 0/5، 1 و 1/5 میلی‌متر با پارامترهای ثابت سرعت چرخش 1400 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 40 میلی‌متر بر دقیقه ایجاد و ترمیم شدند. نتایج نشان داد که ناحیه همزده (SZ) دارای دانه‌های بسیار ریز و هم‌محور بوده که ناشی از تبلور مجدد دینامیکی کامل است و موجب افزایش قابل توجه استحکام کششی و سختی نمونه‌ها نسبت به فلزپایه شد. بیشینه استحکام کششی 66/1 مگاپاسکال و سختی 60 HV در نمونه با شیار 1 میلی‌متر به دست آمد. همچنین، تبلور مجدد دینامیکی ناقص در ناحیه تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) و حذف کامل شیارها در تمامی نمونه‌ها از دیگر نتایج مهم این پژوهش بود. نتایج نشان می‌دهد که عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی توانایی بالایی در ترمیم موضعی ترک‌ها و بهبود خواص مکانیکی منیزیم دارد و می‌تواند به عنوان راهکاری موثر برای افزایش دوام قطعات منیزیمی آسیب‌دیده مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی، ترمیم شیار سطحی، منیزیم، ریزساختار.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: اکبر حیدرزاده، a_heydarzadeh@sbu.ac.ir.

1- مقدمه

طی سال‌های اخیر، کاهش وزن سازه‌ها و افزایش بازده مصرف انرژی در صنایع گوناگون، به یکی از اهداف کلیدی در طراحی مهندسی تبدیل شده است [1]. در این میان، فلز منیزیم به‌عنوان سبک‌ترین فلز سازه‌ای مورد استفاده در صنعت، با توجه به نسبت استحکام به وزن مطلوب، ماشین‌کاری آسان، و قابلیت بازیافت بالا، جایگاه ویژه‌ای در میان مواد مهندسی یافته است [2]. این ویژگی‌ها، کاربرد گسترده منیزیم در صنایع خودروسازی، هوافضا، تجهیزات الکترونیکی قابل حمل و حوزه‌های زیستی را امکان‌پذیر کرده است [3]. با این حال،

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.01]

رفتار مکانیکی شکننده‌تر، حساسیت به تمرکز تنش و خوردگی، از جمله محدودیت‌های ذاتی این فلز در شرایط سرویس محسوب می‌شود [4]. یکی از چالش‌های رایج در کاربردهای صنعتی منیزیم، آسیب‌های سطحی نظیر شیارها و ترک‌های کم‌عمق است که می‌تواند در اثر بارگذاری‌های تکراری، ضربه‌های موضعی یا نقص‌های تولید به وجود آید [5]. این آسیب‌ها، اگرچه در مراحل اولیه ممکن است سطحی به نظر برسند، اما در صورت عدم ترمیم مناسب، به سرعت گسترش یافته و عملکرد قطعه را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند [6-8]. از آنجا که تعویض کامل قطعات منیزیمی همواره به لحاظ اقتصادی یا فنی مقرون‌به‌صرفه نیست، توسعه روش‌های کارآمد برای ترمیم این نوع عیوب، ضرورتی غیرقابل‌چشم‌پوشی است [8-10].

در این راستا، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی(FSW)، به‌عنوان یکی از فرایندهای حالت جامد، قابلیت بالایی در ترمیم نواحی آسیب‌دیده از خود نشان داده است [11-13]. در این روش، با بهره‌گیری از حرارت ناشی از اصطکاک و اعمال تنش‌های مکانیکی، ماده پایه بدون رسیدن به نقطه ذوب دچار نرم‌شدگی و همزدگی موضعی می‌شود که این امر منجر به حذف عیوب سطحی، بهبود ساختار میکروسکوپی، و در نهایت، بازیابی خواص مکانیکی قطعه می‌گردد. از مزایای قابل توجه این روش، می‌توان به کنترل مناسب منطقه آسیب‌دیده، کاهش تنش‌های پسماند و جلوگیری از ایجاد حفرات و ترک‌های ناشی از انجماد اشاره کرد [14-18].

در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و فرایندهای مشتق‌شده از آن، به‌عنوان روش‌های مؤثر برای ترمیم ترک‌ها و آسیب‌های سطحی در فلزات گوناگون به‌طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. گونتر و همکاران [19] موفق به ترمیم ترک‌های مخروطی در فولاد زنگ‌نزن 304 شدند و نشان دادند که دانه‌بندی ریز به دست‌آمده موجب افزایش سختی در ناحیه هم‌زده شده و مقاومت به خوردگی را نیز حفظ می‌کند. ژانگ و همکاران [20] با اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی و عملیات پیرسازی بر آلیاژ Cu-Cr-Zr، به ریزساختاری یکنواخت با دانه‌های فوق‌ریز دست یافتند که خواص مکانیکی را به‌طور چشمگیری بهبود داد. رن و همکاران [21] با تحلیل جریان ماده و رفتار حرارتی در ترمیم ترک آلیاژ آلومینیوم 2024 به‌وسیله فرایند اصطکاکی اغتشاشی، افزایش قابل توجهی در استحکام و تا حدی بازیابی چقرمگی را گزارش کردند. مادلا و آلوری [22] در یک مرور جامع، نشان دادند که فناوری فرایند اصطکاکی اغتشاشی در بهبود خواص میکروسکوپی و مکانیکی انواع اتصالات معیوب عملکرد بسیار مثبتی دارد. همچنین، ساجد و سیدکاشی [23] روش نوینی تحت عنوان "جوشکاری پلاگی اصطکاکی اغتشاشی چندلایه" را برای ترمیم نقص‌های حجیم در صفحات ضخیم آلومینیومی معرفی کردند که در آن، با کنترل مناسب ورودی حرارتی، جوش‌های سالم و مقاوم تولید شد. کیو و همکاران [24] در بررسی خود روی ترمیم شیارهای سطحی در آلیاژهای آلومینیوم با استفاده از فرایند فرایند اصطکاکی اغتشاشی، به این نتیجه رسیدند که شکل و اندازه شیار تأثیر مستقیمی بر کیفیت نهایی ترمیم دارد و خواص مکانیکی ناحیه ترمیم‌شده تا حدود زیادی بازیابی می‌شود. نهایتاً، ناسکار و همکاران [25] نشان دادند که فرایند اصطکاکی اغتشاشی در فولادهای زنگ‌نزن منجر به بهبود رفتار خوردگی حفره‌ای می‌گردد، به‌ویژه با افزایش مرز دانه‌های کم‌زاویه که باعث پایداری بیشتر فیلم‌های پسیو می‌شوند.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی امکان‌پذیری و اثربخشی عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی در ترمیم شیارهای سطحی ایجادشده بر روی ورق‌های منیزیم خالص است. پیش‌بینی می‌شود این روش با ایجاد ناحیه‌ای با ریزساختار اصلاح‌شده و پیوستگی مناسب، قادر به حذف کامل عیوب سطحی بوده و خواص مکانیکی نهایی نمونه‌های ترمیم‌شده را به سطح قابل قبولی نسبت به فلز پایه ارتقا دهد.

2- روش پژوهش

در این مطالعه، از منیزیم خالص تجاری با خلوص بالا به‌عنوان ماده پایه استفاده شد. ماده اولیه به‌صورت شمش ریخته‌گری تهیه شده و سپس به ابعاد مورد نظر برای انجام آزمون‌های

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.01]

تجربی ماشین‌کاری شدند (شکل 1). لازم به ذکر است که به‌دلیل ماهیت ریخته‌گری، فلزپایه دارای دانه‌های درشت اولیه بود که اثر قابل‌توجهی بر نتایج ریزساختاری و مکانیکی نهایی دارد.



شکل1-الف- شمش منیزیم خریداری شده و ب- برش شمش به صورت ورق به وسیله اره لنگ.

به‌منظور شبیه‌سازی آسیب سطحی، شیارهایی به عرض یکسان 0/5 میلی‌متر و عمق‌های متفاوت (0,5، 1 و 1,5 میلی‌متر) به‌صورت منظم و کنترل‌شده روی سطح نمونه‌ها ایجاد شد. این شیارها با استفاده از ابزار دقیق ماشین‌کاری ایجاد شده تا شرایط یکسان و قابل مقایسه‌ای برای تمامی نمونه‌ها فراهم گردد (شکل 2).

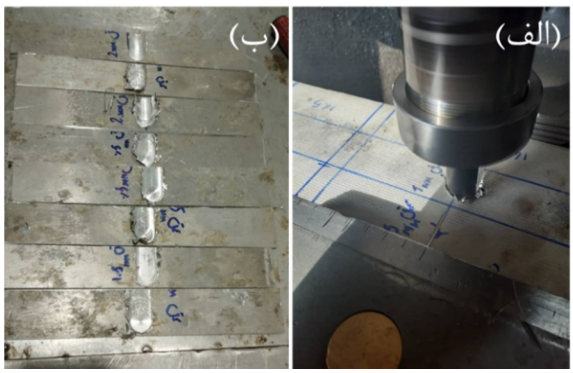


شکل2-الف- اندازه گیری عمق شیار 0/5 میلی‌متری، ب- اندازه گیری عمق شیار 1 میلی‌متری، ج- اندازه گیری عمق شیار 1/5 میلی‌متری و د- اندازه گیری عرض شیارهای 0/5 میلی‌متری.

عملیات ترمیم با استفاده از عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی انجام شد. ابزار مورد استفاده از جنس فولاد ابزار گرم‌کار بوده و دارای پین استوانه‌ای بدون شیب با طول ثابت متناسب با عمق شیارها بود. قطر شانه ابزار 18 میلی‌متر و قطر پین 6 میلی‌متر انتخاب گردید. تمامی نمونه‌ها تحت شرایط یکسان از نظر سرعت چرخش ابزار (1400 دور بر دقیقه) و سرعت پیشروی (40 میلی‌متر بر دقیقه) تحت عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفتند. شایان ذکر است پارامترهای عملیات در نظر گرفته شده، پس از انجام فرایند اولیه در پارامترهای مختلف بر نمونه‌های بدون شیار و با در نظر گرفتن شرط بدون حفره بودن جوش تعیین شدند.در شکل(3)، ابزارهای مورد استفاده و نیز نمونه‌های اولیه تولید شده برای بهینه‌سازی پارامترها نشان داده شده است. همچنین، در شکل(4)، عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشیو نیز نمونه‌های مختلف ترمیم شده نشان داده شده‌اند. در شکل(5)، شماتیک فرایند از دو زاویه دید متفاوت نمایش داده است.



شکل 3-الف- ابزارهای مورد استفاده، ب- نمونه‌های اولیه تولید شده برای بهینه‌سازی پارامترها.

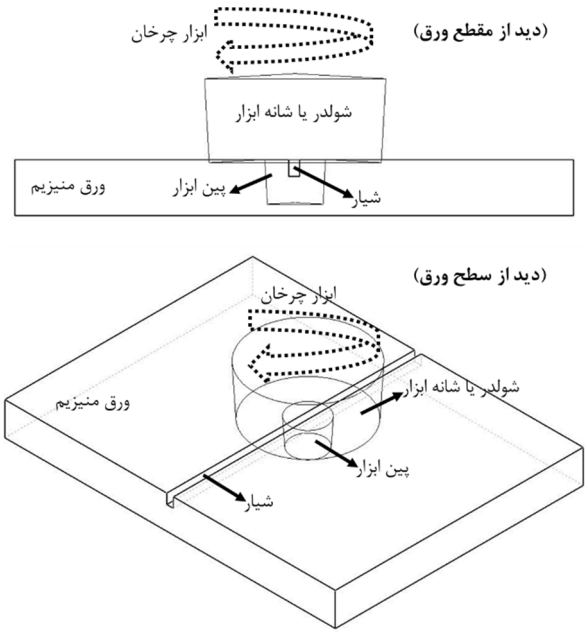


شکل 4-الف فرایند ترمیم و ب- نمونه های ترمیم شده.

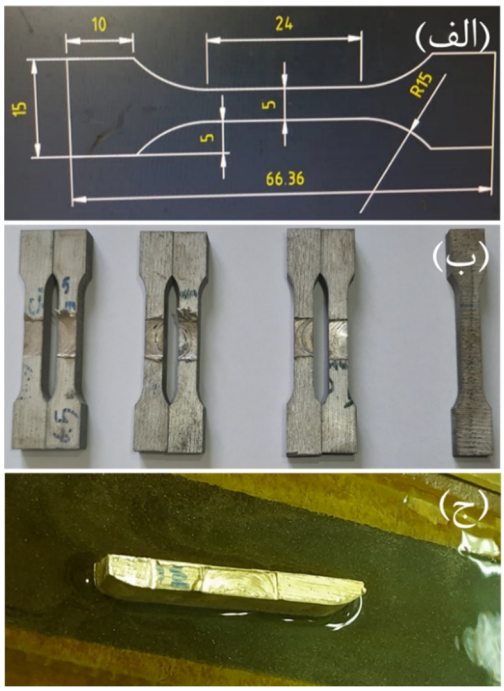
پس از انجام عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی، نمونه‌ها برای مطالعات ریزساختاری آماده‌سازی شدند. برای این منظور، مقاطع عرضی نمونه‌ها پولیش شده و تحت حمله حکاکی شیمیایی با محلول مناسب قرار گرفتند تا مرز دانه‌ها آشکار شود (شکل 6). تصاویر میکروسکوپ نوری (OM) از سه ناحیه مشخص شامل فلزپایه (BM)، ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) و ناحیه همزده (SZ) با بزرگنمایی‌های مختلف ثبت شد.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.01]



شکل5-شماتیک فرایند از دو زاویه دید متفاوت.



شکل6-الف- شماتیک نمونه تست کشش، ب- تصویر نمونه‌های تست کشش و ج- نمونه متالوگرافی.

برای ارزیابی خواص مکانیکی، آزمون کشش تک‌محوره مطابق با استاندارد نشان داده در شکل(6)، روی نمونه‌های ترمیم‌شده و نمونه شاهد (فلزپایه) انجام شد. همچنین، آزمون سختی‌سنجی ویکرز روی ناحیه همزده هر نمونه انجام گردید تا میزان سختی نهایی پس از ترمیم بررسی شود. داده‌های حاصل از این آزمون‌ها برای تحلیل تأثیر عمق شیار بر کارایی فرایند ترمیم با استفاده از عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی مورد استفاده قرار گرفتند.

3- نتایج و بحث

3-1- ریزساختار

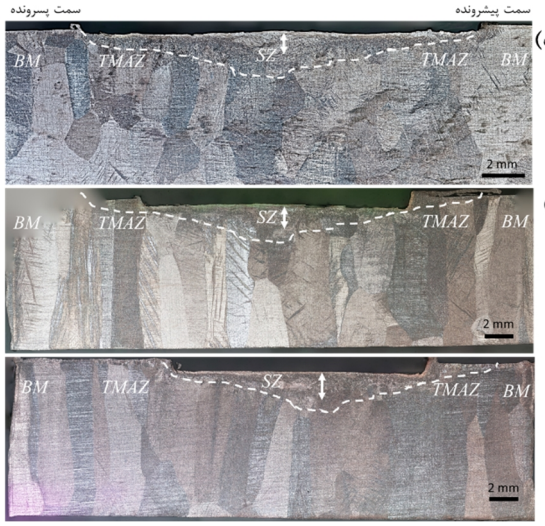
مطالعه ماکروسکوپی مقاطع عرضی نمونه‌ها پس از انجام عملیات عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی (شکل 7)، تغییرات قابل‌توجهی در ریزساختار سه ناحیه اصلی شامل BM، TMAZ و SZ نشان داد.

BM در این پژوهش، منیزیم خالص تولید شده به روش ریخته‌گری بوده که ساختاری درشت‌دانه، ستونی و غیریکنواخت را نشان می‌دهد. این ساختار عمدتاً حاصل گرادیان دمای بالا و نرخ جوانه‌زنی پایین در حین انجماد است. در فرایند ریخته‌گری، ناحیه نزدیک به دیواره قالب به‌دلیل سرعت سرد شدن بالاتر، ساختاری با دانه‌های ریزتر و غالباً هم‌محور نشان می‌دهد؛ اما با دور شدن از دیواره و کاهش نرخ سرد شدن، دانه‌های ستونی رشد یافته و به‌دلیل نبود تلاطم و هم‌زدن در مذاب، این دانه‌ها فرصت رشد جهت‌دار در امتداد گرادیان حرارتی را پیدا می‌کنند. همچنین با توجه به دور بودن این ناحیه از مرکز عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی به‌دلیل نبود تغییر شکل پلاستیک و شرایط دمایی لازم برای تبلور مجدد، دانه‌ها به‌صورت اولیه باقی‌مانده‌اند. چنین ساختاری معمولاً با خواص مکانیکی پایین‌تر، تردی بیشتر و ناهمگنی در رفتار مکانیکی همراه است. این ویژگی‌ها باعث شد تا ساختار ریختگی BM به‌عنوان مبنای مقایسه با نواحی تحت‌تأثیر عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی قرار گیرد، که در آن‌ها پدیده‌هایی نظیر تبلور مجدد دینامیکی و ریزدانه شدن رخ داده است.

در ناحیه TMAZ، ترکیبی از نواحی تبلور نیافته (روشن) و نواحی حاوی دانه‌های ریزتر ناشی از تبلور مجدد دینامیکی (تیره) مشاهده شد (شکل 8). این پدیده به‌دلیل کرنش نسبتاً بالا و حرارت ناشی از اصطکاک در جوار ناحیه همزده اتفاق افتاده است. الگوی تغییرات دانه‌ها در این ناحیه حاکی از وقوع تبلور

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.01]

مجدد دینامیکی ناقص است، به‌طوری‌که هنوز بخش‌هایی از دانه‌های اولیه در حال تبدیل به دانه‌های جدید ریز هستند. در برخی نواحی از منطقه TMAZ، ساختار شامل خطوط نازک و نسبتاً موازی است که به‌همراه دانه‌های ریز در امتداد این خطوط دیده می‌شوند. این ساختار می‌تواند حاصل از آغاز تبلور مجدد در امتداد مرزهای دانه‌ای اولیه یا نواحی با تمرکز تنش بالا باشد. با توجه به ماهیت ساختار بلوری منیزیم و فعال‌بودن دوقلویی به‌عنوان یکی از مکانیزم‌های تغییر شکل در شرایط تنش بالا، احتمال تشکیل مرزهای شبه‌دوقلویی یا تبلور مجدد در امتداد چنین مرزهایی وجود دارد. با این حال، بدون تحلیل‌های دقیق‌تر نظیر پراش الکترونی برگشتی (EBSD)، تشخیص دقیق ماهیت این مرزها (دوقلویی یا خردشدگی دانه‌ای) ممکن نیست.



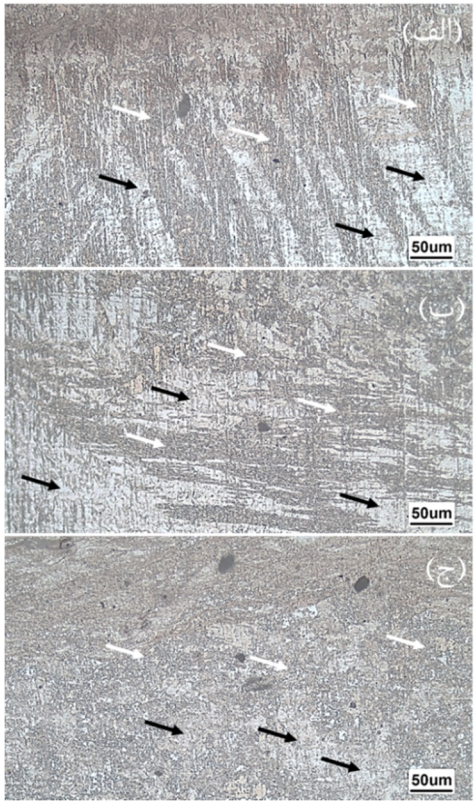
شکل7- تصاویر درشت ساختار نمونه‌های ترمیم شده با شیارهای مختلف: الف- به عمق 0/5 میلی‌متر، ب- به عمق 1 میلی‌متر، ج- به عمق 1/5 میلی‌متر. نواحی مختلف ریزساختاری در تصویر نشان داده شده اند. عمق نفوذ ابزار (ارتفاع پین به ترتیب برابر با 1، 1/5 و 2 میلی‌متر) به وسیله پیکان‌های دوطرفه نمایش داده شده است.

با توجه به شکل(9)، در ناحیه SZ، ساختار ریزدانه‌ای هم‌محور و یکنواختی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده وقوع تبلور مجدد دینامیکی کامل در این ناحیه است [12]. با این حال، بررسی دقیق‌تر اندازه دانه‌ها در سه نمونه با عمق شیار متفاوت، بیانگر تأثیر مستقیم عمق شیار بر ماهیت ریزساختار حاصل است. در نمونه با شیار 1 میلی‌متر، ریزترین اندازه دانه مشاهده شد که می‌تواند ناشی از نسبت بهینه میان حجم ماده واردشده به ناحیه SZ و شرایط حرارتی-مکانیکی حاکم بر آن باشد. عمق کمتر (0/5 میلی‌متر) به دلیل کاهش کرنش پلاستیک و زمان نگهداری در دمای بالا، ممکن است منجر به وقوع تبلور مجدد ناقص یا تشکیل ساختاری با دانه‌هایی اندکی درشت‌تر شده باشد. در مقابل، نمونه دارای شیار 1/5 میلی‌متر علیرغم افزایش حجم ماده درگیر، به‌دلیل افزایش دمای موضعی و نرخ پایین‌تر سرد شدن، نشانه‌هایی از رشد دانه نسبت به نمونه 1 میلی‌متری را نشان می‌دهد. این روند با یافته‌های گزارش‌شده در پیشینه تحقیق نیز همخوانی دارد. به‌عنوان مثال، در مطالعه ژنگ و همکاران [20] بر آلیاژ Cu-Cr-Zr، مشاهده شد که افزایش ناحیه درگیر در حین فرآیند بدون کنترل دقیق شرایط حرارتی می‌تواند منجر به درشت شدن دانه‌ها شود. همچنین رن و همکاران [23]، در آلیاژ آلومینیوم 2024 نشان دادند که توزیع حرارتی و جریان ماده در ناحیه همزده تأثیر مستقیم بر اندازه نهایی دانه‌ها دارد، به‌گونه‌ای که نرخ بالای کرنش و نرخ سرد شدن مناسب باعث شکل‌گیری ریزساختار یکنواخت‌تر و ریزتر می‌شود. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که عمق شیار به‌عنوان یک پارامتر کلیدی، از طریق تغییر شرایط ترمومکانیکی فرایند، بر تبلور مجدد دینامیکی و اندازه دانه‌های نهایی در ناحیه SZ تأثیرگذار بوده است.

با توجه به شکل(10)، در مقاطع عرضی ناحیه همزده، خصوصاً در زوایای نزدیک به سطح فوقانی نمونه که در تماس مستقیم با شانه ابزار بوده‌اند، تغییرات میکروساختاری مشهودی مشاهده شد. در این نواحی، به‌دلیل تماس مستقیم با شانه چرخان ابزار، میزان تنش برشی و حرارت تولیدی به‌مراتب بیشتر از سایر بخش‌های جوش است. این شرایط منجر به ایجاد ناحیه‌ای با دانه‌هایی بسیار ریز شده است؛ به‌گونه‌ای که در بزرگنمایی‌های رایج، مرز دانه‌ها به‌سختی قابل تشخیص بودند. چنین ساختاری معمولاً معرف وقوع تبلور مجدد دینامیکی شدید است که در اثر ترکیب تنش بسیار بالا و نرخ کرنش بزرگ در ناحیه زیر شانه اتفاق می‌افتد [12]. ساختار نهایی در این منطقه، از نوع کاملاً تبلورمجددیافته و با بافتی هم‌محور و پراکندگی یکنواخت اندازه دانه‌ها همراه بود. کاهش شدید اندازه دانه در این ناحیه می‌تواند

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.01]

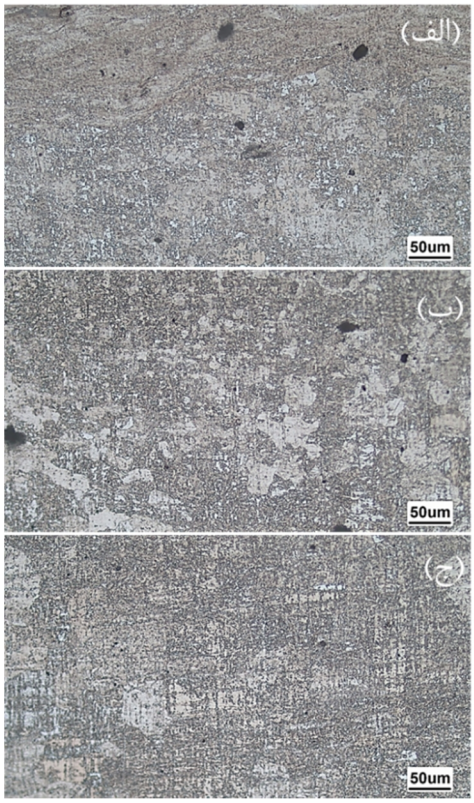
به بهبود قابل توجه خواص سطحی، به‌ویژه سختی، منجر شود [12].



شکل8- تصویر میکروسکوپ نوری ناحیه TMAZ در نمونه‌های ترمیم شده با شیارهای مختلف: الف- به عمق 0/5 میلی‌متر، ب-به عمق 1 میلی‌متر، ج-به عمق 1/5 میلی‌متر. نواحی تبلورمجدد یافته و نیافته به ترتیب با پیکان‌های سفید و مشکی رنگ مشخص شده‌اند.

یکی از ویژگی‌های شاخص مشاهده‌شده در ناحیه همزده، تشکیل ساختارهای حلقه‌ای متحدالمرکز موسوم به حلقه‌های پیازی بود که در تصاویر میکروسکوپی با کنتراست‌های متفاوت درون ناحیه SZ قابل مشاهده‌اند. این پدیده به‌دلیل الگوی گردش ماده تحت اثر ترکیبی چرخش ابزار و حرکت پیشروی آن به‌وجود می‌آید که در شکل(11) نمایش داده شده است.

این پدیده به‌دلیل الگوی خاص جریان مواد در اثر ترکیب چرخش ابزار و حرکت پیشروی آن ایجاد می‌شود [20, 23]. به‌طور مشخص، ماده از جلوی ابزار به سمت پشت آن حرکت می‌کند و این انتقال به‌صورت تناوبی و لایه‌لایه انجام می‌شود. تغییرات موضعی در دما، نرخ کرنش و بافت بلوری، یا حضور ذرات اکسیدی و ناخالصی‌های باقی‌مانده، باعث ایجاد کنتراست‌های نوری میان این لایه‌ها در تصاویر میکروسکوپی می‌گردد [24]. تشکیل حلقه‌های پیازی به‌عنوان نشانه‌ای از جریان پایدار و مناسب ماده در طی فرایند SFSP محسوب می‌شود. علاوه بر آن، پیوستگی و یکنواختی این الگوها می‌تواند نقش مهمی در توزیع همگن خواص مکانیکی در ناحیه جوش ایفا نماید و یکی از شاخص‌های کیفی ترمیم موفق به شمار می‌آید [19, 22].

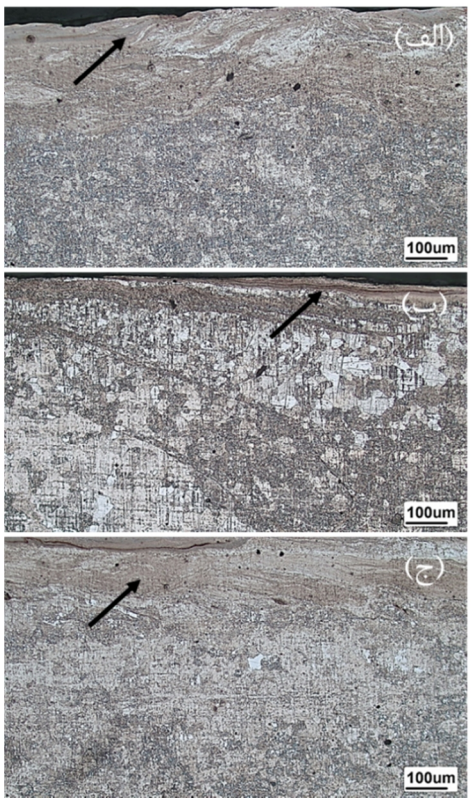


شکل 9-تصویر میکروسکوپ نوری ناحیه SZ در نمونه‌های ترمیم شده با شیارهای مختلف: الف- به عمق 0/5 میلی‌متر، ب- به عمق 1 میلی‌متر، ج- به عمق 1/5 میلی‌متر.

تحلیل دقیق ریزساختار در نواحی TMAZ و SZ نشان‌دهنده آن است که مکانیزم غالب تغییر ساختار دانه‌ها، تبلور مجدد دینامیکی (DRX) می‌باشد. DRX فرایندی است که در آن، در حین تغییر شکل پلاستیک در دمای بالا، دانه‌های جدید و ریز از مرزهای دانه‌ای یا نابجایی‌های تجمع یافته جوانه زده و جایگزین دانه‌های اولیه می‌شوند. این پدیده معمولاً زمانی رخ می‌دهد که دمای فرایند به حدی برسد که نفوذ اتمی قابل توجه باشد (معمولاً بالای نصف دمای ذوب است) و هم‌زمان، میزان

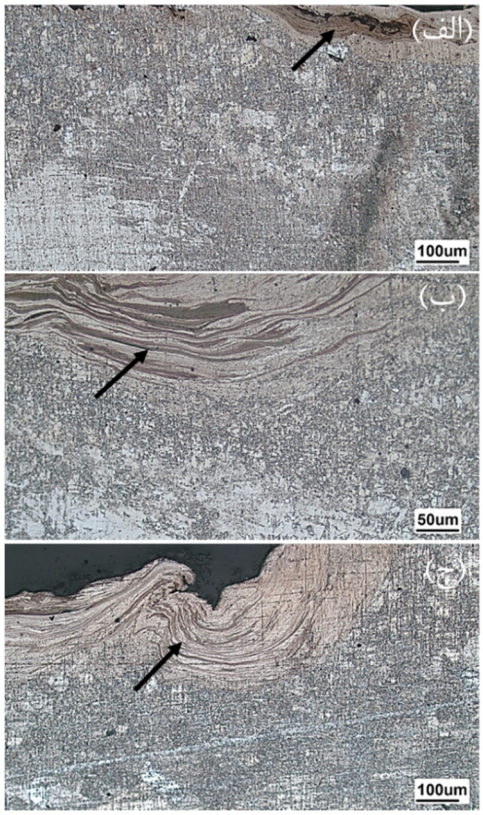
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.01]

کرنش و نرخ کرنش به اندازه‌ای باشد که چگالی نابجایی‌ها در ساختار فلز به حد بحرانی برسد. در عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی به‌دلیل ایجاد گرمای زیاد ناشی از اصطکاک و همچنین کرنش شدید پلاستیک در ناحیه همزده و TMAZ، شرایط برای آغاز و گسترش DRX به‌خوبی فراهم می‌شود [12].



شکل 10- تصویر میکروسکوپ نوری ناحیه زیر شانه در نمونه‌های ترمیم شده با شیارهای مختلف: الف- به عمق 0/5 میلی‌متر، ب- به عمق 1 میلی‌متر، ج- به عمق 1/5 میلی‌متر.

در ناحیه همزده، وقوع DRX به‌صورت کامل بوده و موجب شکل‌گیری دانه‌های هم‌محور و بسیار ریز شده است. این فرایند از طریق جوانه‌زنی دانه‌های جدید در امتداد مرزهای دوقلویی، نوارهای برشی، یا در محل تمرکز نابجایی‌ها آغاز می‌شود و در اثر کرنش‌های شدید گسترش می‌یابد [12]. در ناحیه TMAZ، این فرایند به‌صورت ناقص بوده و ریزساختار حاصل ترکیبی از دانه‌های اصلی تغییر شکل‌یافته و زیردانه‌های جدید است. دمای فرایند، نرخ کرنش و زمان ماند در ناحیه گرم، عوامل اصلی مؤثر بر میزان و کیفیت تبلور مجدد دینامیکی هستند [12]. در نمونه‌هایی که دارای شیارهای عمیق‌تر بودند، به‌دلیل افزایش حجم ماده درگیر در ناحیه همزده، شدت DRX نیز دستخوش تغییر شده و در مواردی مانند نمونه 1 میلی‌متری، ریزدانه‌ترین ساختار به‌دست آمد.



شکل 11-تصویر میکروسکوپ نوری ناحیه "حلقه‌های پیازی" در نمونه‌های ترمیم شده با شیارهای مختلف: الف- به عمق 0/5 میلی‌متر، ب- به عمق 1 میلی‌متر، ج- به عمق 1/5 میلی‌متر.

در مجموع، افزایش عمق شیار تأثیر مستقیمی بر شرایط حرارتی و مکانیکی حاکم بر ناحیه جوش دارد که این موضوع منجر به تغییراتی معنادار در ریزساختار حاصل شده است. نمونه دارای شیار با عمق 1 میلی‌متر با توجه به توازن بهتر بین حجم ماده هم‌زده و نرخ انتقال حرارت، ریزترین ساختار را در ناحیه SZ نشان داد.

در حالی‌که در نمونه 1/5 میلی‌متری به دلیل افزایش بیش‌ازحد حجم ماده ورودی و احتمال ایجاد تمرکز گرمایی، پدیده رشد دانه مشاهده شد. از سوی دیگر، در شیار با عمق کمتر (0/5 میلی‌متر)، علی‌رغم عدم رشد دانه، میزان کرنش و دمای کافی جهت وقوع کامل تبلور مجدد فراهم نبوده و ساختار حاصل نسبتاً درشت‌تر باقی مانده است. این تحلیل مقایسه‌ای

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.01]

نشان می‌دهد که عمق شیار به‌عنوان یک پارامتر کلیدی، نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل ریزساختار نهایی و یکنواختی آن دارد.

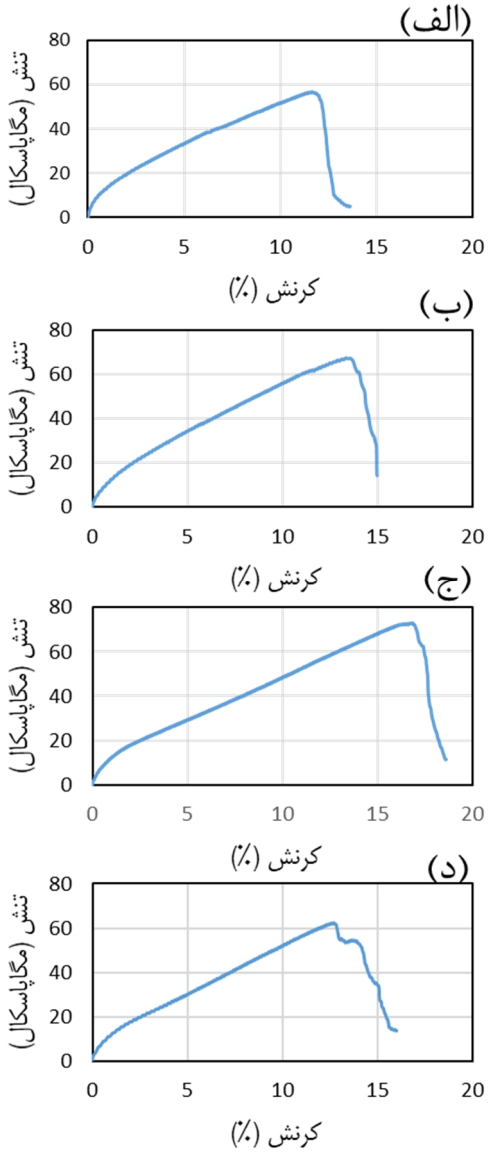
3-2- خواص مکانیکی

نتایج آزمون کشش فلزپایه و نمونه‌های ترمیم‌شده در شکل(12)، نشان می‌دهد که فرایند عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود خواص مکانیکی دارد. نمونه‌های ترمیم‌شده با شیارهای مختلف، عملکرد متفاوتی در برابر بارگذاری کششی از خود نشان دادند که این اختلاف را می‌توان به میزان تغییرات ریزساختاری در ناحیه همزده نسبت داد. همچنین، مقایسه بین استحکام کششی نهایی (UTS) و کرنش شکست نمونه‌های مختلف در شکل‌های(13 و 14) نشان داده شده است.

UTS در تمامی نمونه‌های ترمیم‌شده بالاتر از فلز پایه ثبت شد. درحالی‌که فلز پایه دارای استحکام کششی حدود 56/9 مگاپاسکال بود، این مقدار در نمونه با شیار 0/5 میلی‌متر به 64/7 مگاپاسکال رسید. بیشترین UTS مربوط به نمونه دارای شیار 1 میلی‌متری بود که به 66/1 مگاپاسکال افزایش یافت، که نشان‌دهنده اثربخشی بالای فرایند در ایجاد ساختاری ریزدانه و یکنواخت است. در نمونه با شیار 1/5 میلی‌متری، استحکام کششی نهایی با اندکی کاهش به 62/6 مگاپاسکال رسید که می‌تواند به افزایش حجم ماده تحت فرایند و کاهش کیفیت جریان مواد نسبت داده شود.

کرنش شکست نیز روندی مشابه را دنبال کرد. افزایش کرنش تا مقدار 18/1 درصد در نمونه 1 میلی‌متر، حاکی از بهبود قابل‌توجه شکل‌پذیری نسبت به فلزپایه (13/6 درصد) است. کاهش نسبی کرنش در نمونه 1/5 میلی‌متر (16/1 درصد)، با فرض ایجاد تمرکز تنش یا نواحی کمتر تبلورمجددیافته، منطقی به‌نظر می‌رسد. این نتایج بیانگر آن هستند که ترمیم شیارهای سطحی به کمک عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی نه تنها از بروز افت استحکام جلوگیری کرده، بلکه می‌تواند منجر به بهبود استحکام و چقرمگی گردد، به شرط آنکه پارامترهای فرایند در محدوده بهینه حفظ شوند.

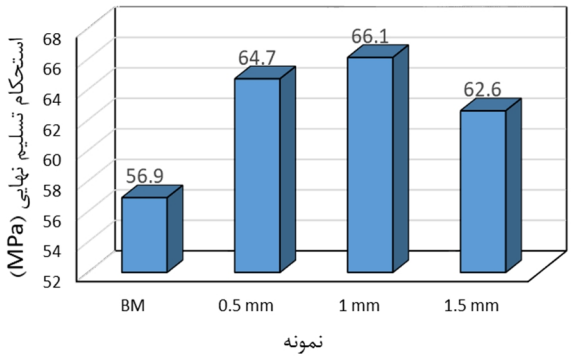
آزمون سختی ویکرز به‌منظور بررسی خواص مکانیکی موضعی در ناحیه همزده، اطلاعات تکمیلی درباره تغییرات ساختاری حاصل از فرایند عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی ارائه داد که در شکل(15) نشان داده است. مقدار سختی فلزپایه در حدود 37 ویکرز ثبت شد که با توجه به ساختار دانه‌های درشت اولیه، قابل انتظار است. پس از اعمال فرایند ترمیم، افزایش قابل‌توجهی در سختی مشاهده شد که مستقیماً به ریزدانه شدن ساختار در ناحیه SZ نسبت داده می‌شود.



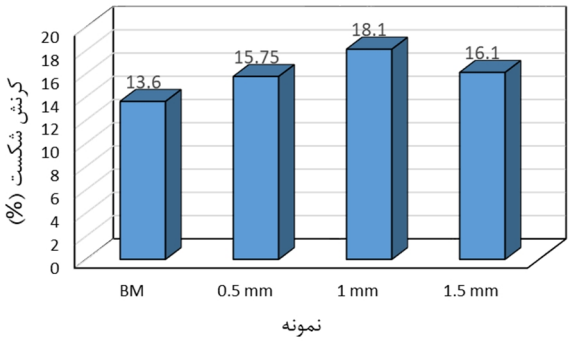
شکل12-منحنی تنش-کرنش مهندسی فلزپایه الف- نمونه‌های ترمیم شده با شیارهای مختلف: ب- به عمق 0/5 میلی‌متر، ج- به عمق 1 میلی‌متر، د-به عمق 1/5 میلی‌متر.

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

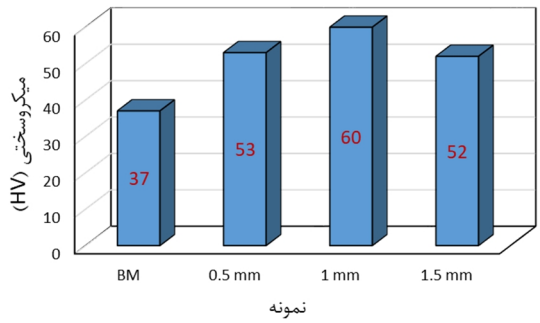
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.01]



شکل 13-مقایسه UTS فلزپایه و نمونه‌های ترمیم شده با شیارهای مختلف.



شکل 14- مقایسه کرنش شکست فلزپایه و نمونه‌های ترمیم شده با شیارهای مختلف.



شکل 15- مقایسه سختی فلزپایه و ناحیه SZ در نمونه‌های ترمیم شده با شیارهای مختلف.

بیشترین مقدار سختی در نمونه با شیار 1 میلی‌متر مشاهده شد (60 ویکرز)، که همراستا با بیشترین استحکام کششی اندازه‌گیری‌شده است. در این نمونه، ساختار کاملاً ریزدانه، هم‌محور و یکنواخت تشکیل شده بود که نشان‌دهنده تبلور مجدد دینامیکی کامل و توزیع کرنش مناسب است. نمونه دارای شیار 0/5 میلی‌متری، با سختی متوسط 53 ویکرز، نشان می‌دهد که با وجود بهبود نسبت به فلزپایه، احتمالاً عمق کم شیار منجر به محدود شدن ناحیه مؤثر فرایند شده است. کاهش سختی در نمونه دارای شیار 1/5 میلی‌متری (52 ویکرز) را نیز می‌توان به کاهش کیفیت جریان ماده و احتمال بروز نواحی ناقص در DRX نسبت داد.

به‌طور کلی، آزمون سختی موضعی تأیید می‌کند که موفقیت عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی در ترمیم شیارهای سطحی، به‌ویژه در ابعاد بهینه، نه‌تنها از منظر استحکام بلکه از نظر ریزسختی نیز قابل توجه است.

3-3- ارتباط بین ریزساختار و خواص مکانیکی

تحولات ریزساختاری ایجاد شده در طول فرایند عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی نقش کلیدی در تعیین خواص مکانیکی نهایی نمونه‌ها دارند. در این پژوهش، مشاهده شد که ناحیه همزده به دلیل اعمال کرنش‌های بزرگ و دمای بالا تحت تأثیر تبلور مجدد دینامیکی قرار گرفته است، که نتیجه آن کاهش چشمگیر اندازه دانه و تشکیل دانه‌های هم‌محور بسیار ریز است (شکل‌های 11-7). این ریزدانه شدن شدید منجر به افزایش استحکام کششی و سختی ناحیه جوش شده نسبت به فلزپایه با دانه‌های درشت می‌شود. کاهش اندازه دانه مطابق با قانون هال-پچ موجب افزایش مقاومت در برابر لغزش نابجایی‌ها و در نتیجه افزایش استحکام کششی نمونه‌ها می‌گردد [29-26].

در نواحی تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی، ریزساختار شامل ترکیبی از دانه‌های تجزیه شده و نواحی تبلور مجدد جزئی است (شکل 8). این نواحی با داشتن ساختار غیر یکنواخت، نقش واسطه‌ای بین فلزپایه و ناحیه همزده را ایفا کرده و به انتقال تدریجی تنش‌ها کمک می‌کنند. وجود پدیده‌های خاص مانند حلقه‌های پیازی (شکل 11) نشان‌دهنده جریان پیچیده مواد و توزیع مجدد کرنش‌ها است که به توزیع یکنواخت‌تر تنش و کاهش تمرکز تنش کمک می‌کند.ارتباط مستقیم بین ریزساختار و خواص مکانیکی همچنین در تغییرات سختی ناحیه جوش قابل مشاهده است؛ افزایش سختی تا مقدار 60HV در نمونه‌های با عمق شیار 1 میلی‌متر نشان‌دهنده اثر مثبت ریزدانه شدن و حذف عیوب ناشی از شیار است. کاهش

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.01]

سختی در نمونه با عمق شیار 1/5 میلی‌متر می‌تواند به دلیل افزایش ابعاد دانه ناشی از کاهش کرنش وارده و تغییرات حرارتی فرایند باشد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌سازی پارامترهای عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی به منظور ایجاد ریزساختاری یکنواخت، ریزدانه و فاقد عیب، کلید دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب در ترمیم ترک‌های سطحی منیزیم است. این ارتباط قوی بین ساختار و خواص، اهمیت مطالعه دقیق ریزساختار را در بهبود عملکرد مکانیکی قطعات جوش‌خورده برجسته می‌کند.

4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ترمیم شیارهای سطحی ایجاد شده روی نمونه‌های منیزیم خالص با استفاده از فرایند عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفت. شیارهایی با عمق‌های مختلف (0/5، 1 و 1/5 میلی‌متر) به‌صورت کنترل‌شده ایجاد و سپس با پارامترهای ثابت شامل سرعت چرخش 1400 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 40 میلی‌متر بر دقیقه ترمیم شدند. نتایج تجربی به‌صورت کامل تحلیل و ارتباط بین ریزساختار ایجاد شده و خواص مکانیکی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج اصلی تحقیق به شرح زیر است:

- در تمامی نمونه‌های ترمیم شده، ناحیه همزده (SZ) با دانه‌های بسیار ریز و هم‌محور شکل گرفت که نشان‌دهنده تبلور مجدد دینامیکی کامل در این ناحیه است و موجب افزایش استحکام کششی و سختی نسبت به فلزپایه شد.

- ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) شامل دانه‌هایی با تبلور مجدد جزئی و نواحی دارای دوقلویی بود که نقش انتقال‌دهنده تنش میان فلزپایه و ناحیه همزده را ایفا می‌کند.

- با افزایش عمق شیار از 0/5 تا 1 میلی‌متر، اندازه دانه در ناحیه همزده کاهش یافته و خواص مکانیکی بهبود یافت، اما در عمق شیار 1/5 میلی‌متر به دلیل کاهش کرنش اعمال شده و تغییرات حرارتی، اندازه دانه کمی افزایش یافته و خواص مکانیکی به میزان اندکی کاهش نشان دادند.

- حذف کامل شیارهای سطحی در فرایند ترمیم با عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی موفقیت‌آمیز بوده و هیچ عیب قابل مشاهده‌ای در ناحیه جوش یافت نشد، که بیانگر پتانسیل بالای این روش برای ترمیم ترک‌ها و شیارهای سطحی در منیزیم است.

- بیشینه استحکام کششی و کرنش شکست مربوط به نمونه با شیار 1 میلی‌متر بوده که افزایش قابل توجهی نسبت به فلزپایه نشان می‌دهد، به طوری که UTS از 56/9 مگاپاسکال در فلزپایه به 66/1 مگاپاسکال در این نمونه افزایش یافت.

- سختی ناحیه همزده نیز بیشترین مقدار را در نمونه با عمق شیار 1 میلی‌متر حدود 60 HV داشته است و در نمونه 1/5 میلی‌متر کاهش نسبی دیده شد که این نتایج با تغییرات ریزساختار و میزان تبلور مجدد دینامیکی همخوانی دارد.

- این پژوهش نشان داد که فرایند عملیات سطحی اصطکاکی اغتشاشی، با پارامترهای مناسب، توانایی بالایی در ترمیم موفق ترک‌ها و بهبود خواص مکانیکی منیزیم دارد، که می‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش دوام و کارایی قطعات منیزیمی آسیب‌دیده باشد.

منابع

1-Tan J, Ramakrishna S. 2021. Applications of magnesium and its alloys: A review. Applied Sciences. 11(15):6861.

2-Bahram K, Kaci DA, Chaib M, Dorbane A, Hamidou B, Slimane A, et al. 2025. Predictive modeling and optimization of ultimate tensile strength in friction stir welding of Al6061 using DOE and genetic algorithms. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1-10.

3-Staiger MP, Pietak AM, Huadmai J, Dias G. 2006. Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: a review. Biomaterials. 27(9):1728-34.

4-Kumar DS, Sasanka CT, Ravindra K, Suman K. 2015. Magnesium and its alloys in automotive applications – a review. American Journal of Materials Science and Technology. 4(1):12-30.

5-Kulekci MK. 2008. Magnesium and its alloys applications in automotive industry. The

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.01]

18-Orozco-Caballero A, Álvarez-Leal M, Ruano OA, Carreño F. 2022. Improving the mechanical properties of a WE54 magnesium alloy through severe friction stir processing and rapid cooling. Materials Science and Engineering: A. 856:143963.
19-Gunter C, Miles MP, Liu FC, Nelson TW. 2018. Solid state crack repair by friction stir processing in 304L stainless steel. Journal of Materials Science & Technology. 34(1):140–147.
20-Zhang Z, Wan L, Wen Q, Feng Z, Shi Y. 2025. Repairing crack in Cu-Cr-Zr alloy towards forging mechanical properties via friction stir processing and aging treatment. Materials & Design. Jun 20:114286.
21-Maddela N, Aluri M. 2021. Study on defects repairing using Friction Stir technologies. Materials Today: Proceedings. 44:2373–2379.
22-Ren JG, Wang L, Xu DK, Xie LY, Zhang ZC. 2017. Analysis and modeling of friction stir processing-based crack repairing in 2024 aluminum alloy. Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 30(3):228–237.
23-Sajed M, Seyedkashi SH. 2020. Multilayer friction stir plug welding: A novel solid-state method to repair cracks and voids in thick aluminum plates. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 31:467–477.
24-Qiu L, Sun GQ, Wang HH, Zhang ZX, Jiang XQ, Chen SJ. 2025. Research on repair process and mechanical properties of surface grooves on aluminum alloys based on friction stir technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Jun 20:1–6.
25-Naskar A, Bhattacharyya M, Raja KS, Charit I, Darsell J, Jana S. 2020. Pitting behavior of friction stir repair-welded 304L stainless steel in 3.5% NaCl solution at room temperature: role of grain and defect structures. *SN* Applied Sciences. 2(12):2164.
26-Hansen N. 2004. Hall–Petch relation and boundary strengthening. Scripta materialia. 51(8): 801-6.
27-Huskins E, Cao B, Ramesh K. 2010. Strengthening mechanisms in an Al–Mg alloy. Materials Science and Engineering: A.527(6):1292-8.
28-Abd El-Aty A, Xu Y, Guo X, Zhang S-H, Ma Y, Chen D. 2018. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review. Journal of advanced research.10:49-67.
29-Ryen Ø, Holmedal B, Nijs O, Nes E, Sjölander E, Ekström H-E. 2006. Strengthening mechanisms in solid solution aluminum alloys. Metallurgical and Materials Transactions A.37:1999-2006.
International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 39:851-65.
6-King A, Ludwig W, Herbig M, Buffière JY, Khan AA, Stevens N, et al. 2011. Three-dimensional in situ observations of short fatigue crack growth in magnesium. Acta Materialia. 59(17):6761-71.
7-Potzies C, Kainer KU. 2004. Fatigue of magnesium alloys. Advanced Engineering Materials. 6(5):281-9.
8-Jiang J, Geng X, Zhang X. 2023. Stress corrosion cracking of magnesium alloys: A review. Journal of Magnesium and Alloys. 11(6):1906-30.
9-Hauser FE, London PR, Dorn JE. 1956. Fracture of magnesium alloys at low temperature. JOM. 8(5):589-92.
10-Rodriguez AK, Ayoub GA, Mansoor B, Benzerga AA. 2016. Effect of strain rate and temperature on fracture of magnesium alloy AZ31B. Acta Materialia. 112:194-208.
11-Mishra RS, Haridas RS, Agrawal P. 2022. Friction stir-based additive manufacturing. Science and Technology of Welding and Joining. 27(3):141-65.
12-Heidarzadeh A, Mironov S, Kaibyshev R, Çam G, Simar A, Gerlich A, et al. 2020. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. Progress in Materials Science. 100752.
13-Mishra RS, Ma ZY. 2005. Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering: R: Reports. 50(1-2):1-78.
14-Kumar K, Kailas SV, Srivatsan TS. 2008. Influence of tool geometry in friction stir welding. Materials and Manufacturing Processes. 23(2):188-94.
15-Wu B, Yusof F, Li F, Miao H, Bushroa A, Muhamad MRB, et al. 2024. Effects of friction stir processing and nano-hydroxyapatite on the microstructure, hardness, degradation rate and in-vitro bioactivity of WE43 alloy for biomedical applications. Journal of Magnesium and Alloys. 12(1):209-24.
16-Hasani BM, Hedaiatmofidi H, Zarebidaki A. 2021. Effect of friction stir process on the microstructure and corrosion behavior of AZ91 Mg alloy. Materials Chemistry and Physics. 267:124672.
17-Luo XC, Kang LM, Liu HL, Li ZJ, Liu YF, Zhang DT, et al. 2020. Enhancing mechanical properties of AZ61 magnesium alloy via friction stir processing: Effect of processing parameters. Materials Science and Engineering: A. 797:139945.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.01]