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



Experimental and numerical evaluation of groove depth effect on microstructural and mechanical behavior in repairing 7075 aluminum alloy by friction stir welding

R. Dadashpour[1], M. Sajed[1*], M. A. Saeimi Sadigh[1], A. Abyazi[2], A. Heidarzadeh[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

2- Department of Materials Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

Received 2 November 2025 ; Accepted 7 December 2025

Abstract

In this study, the Friction Stir Welding process was employed to repair artificial cracks and grooves in 7075 aluminum alloy. Samples with different groove depths (0.5, 1, 1.5, and 2 mm) were prepared and evaluated through experimental tests, metallographic analysis, tensile testing, and numerical simulation using Abaqus software. The results showed that the Friction Stir Welding successfully repaired the defects without creating voids or surface irregularities. Microstructural observations in the stir zone revealed that dynamic recrystallization led to the formation of fine and homogeneous grains, resulting in improved hardness and tensile strength. The specimen with a 1 mm groove depth exhibited the best mechanical performance, with a maximum hardness of approximately 109 HV and the highest tensile strength among all samples. Conversely, samples with 0.5 and 2 mm groove depths showed void formation and reduced strength due to insufficient or excessive heat input and uneven material flow. Both experimental and simulation results confirmed that a groove depth of 1 mm provides optimal conditions for defect repair in 7075 aluminum alloy.

Keywords: Friction Stir Welding, 7075 Aluminum Alloy, Hardness, Tensile Strength, Numerical Simulation.

*Corresponding Author: M. Sajed, sajed@azaruniv.ac.ir.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.07]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال یازدهم، شماره2، پاییز و زمستان 1404



ارزیابی تجربی و عددی اثر عمق شیار بر رفتار ریزساختاری و مکانیکی در ترمیم ترک آلیاژ آلومینیوم 7075 با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

رامین داداش پور، موسی ساجد[1*]، محمد علی صائیمی صدیق[1]، آرزو ابیضی[2]، اکبر حیدرزاده[2]

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.

دریافت مقاله: 1404/08/11 ؛ پذیرش مقاله: 1404/09/16

چکیده

در این پژوهش، از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای ترمیم ترک‌ها و شیارهای مصنوعی در آلیاژ آلومینیوم 7075 استفاده شد. نمونه‌هایی با عمق شیارهای متفاوت (0،5، 1، 1،5 و 2 میلی‌متر) تهیه و تحت آزمایش‌های تجربی، متالوگرافی، تست کشش و شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار Abaqus مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قادر به ترمیم کامل ترک‌ها بدون ایجاد تخلخل یا نقص سطحی است. بررسی ریزساختار ناحیه همزده نشان داد که تبلور مجدد دینامیکی منجر به تشکیل ساختار ریزدانه و همگن شده و در نتیجه موجب افزایش سختی و استحکام کششی گردیده است. نمونه با شیار 1 میلی‌متر، به‌عنوان بهترین حالت، بیشترین سختی (حدود 109 ویکرز) و استحکام کششی را نسبت به سایر نمونه‌ها نشان داد. در مقابل، در نمونه‌های 0،5 و 2 میلی‌متر به‌دلیل شرایط حرارتی نامناسب و جریان غیریکنواخت ماده، تخلخل‌هایی ایجاد و افت استحکام مشاهده شد. نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی کاملاً با یکدیگر هم‌خوانی داشتند و نشان دادند که عمق شیار 1 میلی‌متر شرایط بهینه برای ترمیم ترک‌ها در آلیاژ آلومینیوم 7075 به‌شمار می‌رود.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلیاژ آلومینیوم 7075، سختی، استحکام کششی، شبیه‌سازی عددی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: موسی ساجد، sajed@azaruniv.ac.ir.

1- مقدمه

جوشکاری یکی از فرایندهای مهم ساخت و تولید است که با هدف ایجاد اتصال دائمی میان مواد مهندسی از جمله فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها انجام می‌شود. این فرایند معمولاً از طریق اعمال حرارت و ذوب موضعی مواد و سپس انجماد آن‌ها صورت می‌گیرد و از روش‌های دما پایین‌تری نظیر لحیم‌کاری نرم و سخت متمایز است [1]. در بیشتر روش‌های جوشکاری، فلز پایه به همراه فلز پرکننده ذوب شده و پس از

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.07]

انجماد، اتصال ایجاد می‌شود؛ با این حال، این روش‌ها همواره با مشکلاتی مانند تنش‌های پسماند، تغییرات ریزساختاری نامطلوب و تخلخل همراه هستند [2]. به‌ویژه در آلیاژهای آلومینیوم گرید هوایی، جوشکاری ذوبی معمولی به‌دلیل حساسیت به ترک گرم و اکسیداسیون، کارایی مناسبی ندارد و در نتیجه نیاز به روش‌های نوین‌تری همچون جوشکاری حالت جامد احساس می‌شود.

یکی از روش‌های پیشرفته در این حوزه، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) است که در سال 1991 توسط مؤسسه جوشکاری انگلستان (TWI) معرفی شد. در این فرایند، اتصال در حالت جامد و به‌وسیله یک ابزار غیرمصرفی متشکل از پین و شانه انجام می‌شود، بدون آن‌که نیاز به فلز پرکننده یا منبع حرارتی خارجی باشد [3]. ابزار با چرخش و پیشروی خود، موجب نرم شدن ماده در اطراف پین و جریان پلاستیکی آن شده و اتصال یکنواختی بین قطعات ایجاد می‌کند. این روش به‌دلیل کنترل مناسب بر ورودی حرارت و عدم ذوب فلز پایه، مزایایی نظیر کاهش اعوجاج، بهبود خواص مکانیکی و افزایش کیفیت سطح اتصال دارد. FSW امروزه در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا، کشتی‌سازی و ساخت تجهیزات سبک‌وزن کاربرد گسترده‌ای یافته است [4].

از چالش‌های متداول در قطعات آلومینیومی، آسیب‌های سطحی نظیر شیارها و ترک‌های کم‌عمق است که در اثر فرایندهای ماشین‌کاری، بارگذاری‌های تکراری یا ضربه‌های موضعی به‌وجود می‌آیند [5]. روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به‌دلیل توانایی در اصلاح موضعی ساختار فلز و ایجاد اتصال سالم بدون ذوب، گزینه‌ای مناسب برای ترمیم نواقص سطحی محسوب می‌شود. در این فرایند، حرارت ناشی از اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک، زمینه‌ساز وقوع تبلور مجدد دینامیکی است که منجر به تشکیل دانه‌های ریز و بهبود خواص مکانیکی ناحیه جوش می‌شود [6].

مطالعات متعددی عملکرد این روش در ترمیم آلیاژهای آلومینیومی را بررسی کرده‌اند. مادلا نادندر و همکاران نشان دادند که وجود تخلخل پس از ماشین‌کاری می‌تواند استحکام اتصال را به‌طور محسوسی کاهش دهد [7]. ساچیدر و همکاران [8] اهمیت زمان نگهداری ابزار در آغاز فرایند را برای دستیابی به دمای خمیری مناسب در منطقه اتصال گزارش کردند. جاشووا و همکاران [9] نیز فرایند ترمیم ترک در آلیاژهای A6063 و A5052 را با ابزار فولادی H13 مطالعه کرده و تأثیر عمق نفوذ و سرعت چرخش ابزار را بر کیفیت اتصال بررسی کردند. علاوه بر این، قودامان و همکاران [10] نشان دادند که جنس و هندسه ابزار نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش عیوب و افزایش استحکام جوش دارد.

در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ریزساختار نمونه‌های جوش‌خورده معمولاً شامل چهار ناحیه مجزا است: ناحیه اغتشاشی (SZ)، ناحیه تحت تأثیر کار مکانیکی و حرارت (TMAZ)، ناحیه تحت تأثیر حرارت (HAZ) و فلز پایه (BM) [10]. در ناحیه اغتشاشی به‌دلیل وقوع تبلور مجدد کامل، دانه‌ها ریز و هم‌محور هستند، در حالی‌که در ناحیه TMAZ، تغییر شکل پلاستیکی و حرارت منجر به تبلور مجدد ناقص و ساختار ناپایدار می‌شود [12]. علاوه بر این، در سطح مقطع جوش ناحیه‌ای موسوم به «هوک» نیز مشاهده می‌شود که بیانگر محل اتصال نسبی ورق‌ها در اثر جریان ماده است [3].

از آن‌جا که هندسه ابزار نقش اساسی در جریان ماده، میزان حرارت ورودی و در نهایت ریزساختار ناحیه جوش دارد، پژوهش‌های متعددی در زمینه طراحی ابزار انجام شده است. یویانگ [3] نشان داد که طول و قطر پین باید با ابعاد نقص سازگار باشد تا از ایجاد نواحی با دمای پایین یا حفره‌های خالی جلوگیری شود. مادلا [7] با مقایسه دو نوع ابزار دارای شانه مقعر و محدب نشان داد که ابزار با شانه محدب به‌دلیل کاهش سطح تماس، کیفیت سطحی بهتری ایجاد می‌کند. یوشونگ تانگ [13] نیز با طراحی پین پله‌ای مخروطی، بهبود قابل‌توجهی در پرشدن حفرات و همگنی ریزساختار گزارش کرد.

از دیدگاه صنعتی در بسیاری از قطعات مهندسی به‌ویژه در صنایع هوافضا، خودرو و تجهیزات سبک‌وزن، بروز شیارهای سطحی و ناهمواری‌های موضعی یک مشکل رایج و گاهی اجتناب‌ناپذیر است. این شیارها معمولاً در اثر فرایندهای

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.07]

ماشین‌کاری پرسرعت، آسیب‌های ناشی از ضربه، تنش‌های تمرکزیافته، سایش موضعی و حتی خطاهای تولید به وجود می‌آیند. وجود چنین نواقصی، حتی در مقیاس نسبتاً کوچک، می‌تواند منجر به کاهش استحکام خستگی، ایجاد تمرکز تنش، تسریع رشد ترک و در نهایت کاهش عمر کاری قطعه شود؛ مشکلی که در آلیاژهای آلومینیوم سری 7000 به‌دلیل حساسیت بالا به ریزترک‌زایی و ماهیت رسوب‌سخت‌شونده این آلیاژها اهمیت بیشتری دارد. از آن‌جا که تعویض کامل قطعه یا انجام عملیات حرارتی گسترده هزینه‌بر بوده و در بسیاری از کاربردها امکان‌پذیر نیست، استفاده از فرایندهای ترمیمی موضعی با حداقل تغییر در ساختار کلی قطعه ضروری است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به‌عنوان یک فرایند حالت‌جامد، به دلیل توانایی در بازپخت و بازآرایی ریزساختار آسیب‌دیده و پرکردن شیار از طریق جریان شدید پلاستیکی ماده، یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای ترمیم این نوع نقص‌ها محسوب می‌شود. ارزیابی دقیق رفتار ریزساختاری و مکانیکی در هنگام ترمیم شیارهایی با عمق‌های متفاوت، می‌تواند دید مهمی درباره کارایی این روش در شرایط واقعی صنعت فراهم کند و خلأ موجود در مطالعات پیشین را در این حوزه برطرف سازد.

در مجموع، با وجود مطالعات پیشین در حوزه FSW، بررسی اثر عمق شیارهای سطحی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، هدف پژوهش حاضر، ارزیابی تجربی کارایی فرایند FSW در ترمیم شیارهای سطحی با عمق‌های مختلف در آلومینیوم خالص و تحلیل اثر این پارامتر بر ریزساختار و خواص مکانیکی نواحی مختلف جوش است.

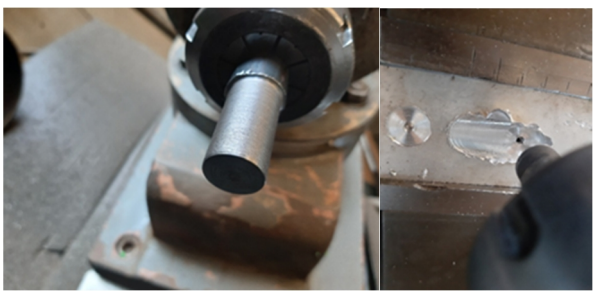
2- روش پژوهش

روش FSW به‌عنوان روشی مؤثر برای ترمیم ترک‌ها و عیوب سطحی قطعات آلومینیومی مورد استفاده قرار گرفت. هدف از این پژوهش، افزایش عمر مفید قطعات و ارزیابی امکان‌پذیری ترمیم نواقص سطحی در آلیاژ آلومینیوم 7075 بود. ترک‌های مصنوعی با استفاده از تیغه فرز به ضخامت 1 میلی‌متر و در عمق‌های مختلف (0,5، 1، 1,5 و 2 میلی‌متر) ایجاد شدند. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها به دو گروه برای آزمون کشش و بررسی ریزساختار متالوگرافی تقسیم شدند. ابزارهای مورد استفاده از جنس فولاد گرم‌کار H13 انتخاب شدند که به‌دلیل مقاومت بالا در برابر دما و سایش، کاربرد گسترده‌ای در فرایندهای جوشکاری آلومینیوم دارد [14]. این ابزارها مطابق طراحی اولیه تراشکاری و عملیات حرارتی شدند تا سختی آن‌ها به حدود 52 راکول C برسد، که در محدوده‌ی پیشنهادی (50 تا 56 راکول C) است (شکل 1).



شکل1- ابزارهای سخت‌کاری شده (52 راکول سی).

یکی از چالش‌های فرایند FSW، باقی‌ماندن حفره ناشی از خروج پین ابزار در انتهای مسیر جوش است که می‌تواند منجر به تمرکز تنش و خوردگی موضعی شود. برای رفع این مشکل، ابزاری ویژه بدون پین طراحی و ساخته شد که دارای شانه تخت با شیارهای سطحی به عمق 0,5 میلی‌متر و قطر 18 میلی‌متر است. جنس این ابزار نیز فولاد H13 بوده و پس از عملیات حرارتی، سختی آن به 52 راکول C رسانده شد (شکل2).



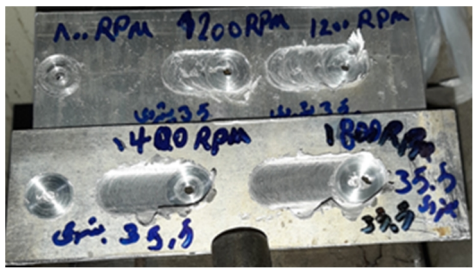
شکل2- ابزار بدون پین جهت حذف حفره در انتهای جوشکاری.

تنها تفاوت ابزارها در طول پین بود که متناسب با عمق شیار طراحی شد. بر اساس تجربیات قبلی در جوشکاری آلیاژ 5052، قطر پین حدود 0,5 میلی‌متر بزرگ‌تر از عرض شیار انتخاب

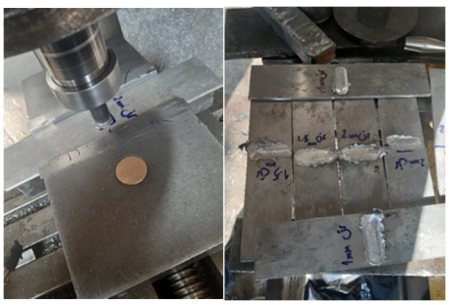
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.07]

گردید تا از ایجاد تخلخل در اتصال جلوگیری شود. فرایند جوشکاری بر روی ورق‌های آلومینیومی به ابعاد استاندارد انجام شد. برای کلیه نمونه‌ها، سرعت دورانی ابزار 1400 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 35,5 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد تا شرایط بهینه حرارتی و مکانیکی فراهم گردد (شکل‌های 3 و 4). پس از اتمام جوشکاری، نمونه‌ها جهت آزمون کشش (3 نمونه به ازای هر شرایط) مطابق استاندارد ASTM E8 و مشاهده ریزساختار، آماده‌سازی شدند. در آزمون کشش، از دستگاه Universal Testing Machine ستام STM-5 استفاده شد.



شکل3- جوشکاری و تست مرحله دوم برای ورق 5052.



شکل4-نحوه ترمیم ترک ورق آلومینیومی 7075.

برای بررسی‌های متالوگرافی، نمونه‌های متالوگرافی بر اساس استاندارد ASTM E3 آماده‌سازی شدند، که شامل مراحل برش، نصب، سنباده‌زنی، صیقل‌کاری و اچ کردن می‌باشد. نمونه‌ها با روش وایرکات برش داده شده و مراحل سنباده‌زنی از زبری 100 تا 3000 به‌صورت متقاطع انجام شد. سپس با دستگاه پولیش و دوغاب آلومینا، سطح نمونه‌ها صیقل داده شده و با محلول اچ شامل اسید نیتریک، کلریدریک و فلوئورید اچ شدند تا ساختار دانه‌ها در میکروسکوپ نوری قابل مشاهده گردد. برای آنالیز ریزساختاری، مقاطع نمونه‌ها تحت میکروسکوپ نوری Olympus CX33 مورد بررسی قرار گرفتند. برای سختی‌سنجی از روش ویکرز مطابق با استاندارد ASTM E92 و دستگاه VTSYIQI Digital Ultrasonic Hardness Tester استفاده شد، زیرا این روش به‌دلیل گستره‌ی وسیع نیروی اعمالی، برای مواد نرم تا سخت مناسب است. در آزمون سختی‌سنجی، روش ویکرز به‌کار رفته است؛ به‌عنوان مثال، می‌توان از دستگاه « «با مقیاس HV استفاده کرد که دقت مناسبی برای مقادیر ویکرز دارد. در برای تحلیل حرارتی و بررسی جریان ماده در ناحیه جوش، شبیه‌سازی عددی فرایند در نرم‌افزار ABAQUS 2024 انجام گرفت. مدل هندسی شامل ورق آلومینیومی با شیار مصنوعی (به‌عنوان ترک) به ابعاد 1,5×1 میلی‌متر و ابزار FSW بود (شکل 5). در این مدل، ابزار به‌صورت جسم صلب در نظر گرفته شد و تماس حرارتی بین ابزار و قطعه‌کار لحاظ گردید. قطعه‌کار در محور Z ثابت بوده و دمای محیط $20^{\circ}C$ فرض شد. ضریب انتقال حرارت بین قطعه و هوا $0,02\ N/mm\cdot^{\circ}C$ تعریف گردید. برای دقت بالاتر، مش‌بندی با المان‌های تتراهدرال انجام شد. ابزار دارای 15172 المان و 33974 گره و قطعه‌کار شامل 24875 المان و 6050 گره بود. خواص مکانیکی مواد در مدل به‌صورت زیر تعریف شد:

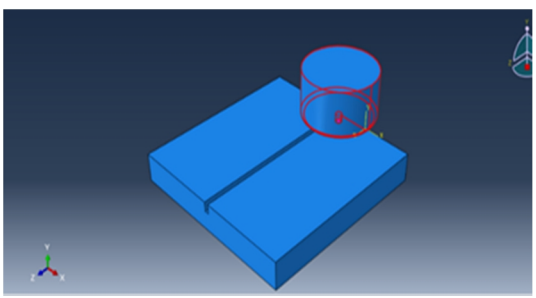
دانسیته آلومینیوم: $0,23\ g/cm^3$

دانسیته فولاد ابزار: $0,09\ g/cm^3$

مدول یانگ آلومینیوم: 70 GPa

مدول یانگ ابزار: 200 GPa

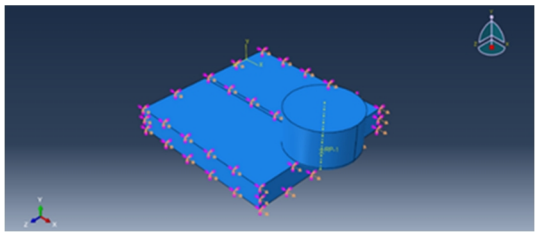
در مراحل اولیه، اعوجاج در لبه‌های قطعه مشاهده شد که با ریزتر کردن مش‌ها در نواحی بحرانی برطرف گردید. بارگذاری حرارتی و مکانیکی به‌صورت طولی در راستای حرکت ابزار اعمال شد تا شیب حرارتی و پروفیل دمایی در طول مسیر جوش به‌درستی شبیه‌سازی شود (شکل 6).



شکل5- نمونه مدل شده عمق 1/5 میلیتری با استفاده از نرم افزار آباکوس.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.07]



شکل6- حرکت و بار در جهت ابزار داده شده در نرم افزار آباکوس.

3- نتایج و بحث

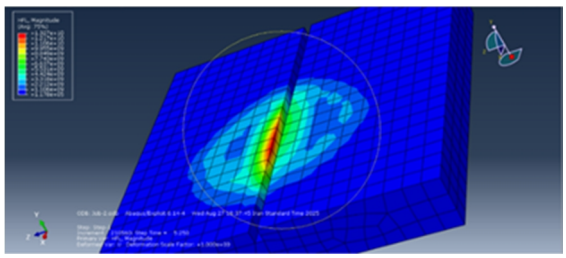
به‌منظور بررسی نحوه توزیع دما در حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، از ترکیب نتایج شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار ABAQUS 2024 و اندازه‌گیری‌های تجربی دما استفاده شد. شرایط فرایند شامل سرعت چرخش ابزار 1400 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 35,5 میلی‌متر بر دقیقه بود. اندازه‌گیری تجربی دما در فاصله‌ی 20 میلی‌متری از مرکز جوش و با استفاده از دماسنج مادون‌قرمز انجام شد.

مطابق جدول(1)، بیشترین دمای ثبت‌شده در آزمایش‌ها مربوط به نمونه با شیار 1,5 میلی‌متر و حدود 353 °C بوده است که تطابق مناسبی با نتایج شبیه‌سازی (حدود 250 °C) دارد. این دما در محدوده مناسب برای رخداد تبلور مجدد دینامیکی در آلیاژهای آلومینیوم سری 7000 قرار می‌گیرد. الگوی دمایی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی (شکل 7 و 8) نشان می‌دهد که بیشینه دما در ناحیه زیر شولدر متمرکز است و با فاصله گرفتن از مرکز ابزار، شیب دمایی به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد.

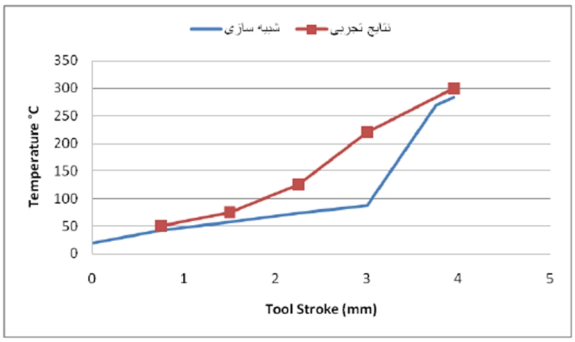
جدول1- اندازه گیری دمای قطعه‌کار جوشکاری با سرعت 1400 دور بر دقیقه

دمای قطعه‌کار در شبیه‌سازی	دمای قطعه‌کار با ترمومتر	دمای محیط در هنگام جوشکاری	اندازه نمونه
40درجه سانتی گراد	95 درجه سات گراد	25درجه سانتی گراد	0/5 میلیمتری
180درجه‌سانتی گراد	205درجه‌سانتی گراد	25درجه‌سانتی گراد	1 میلیمتری
250درجه‌سانتی گراد	353درجه‌سانتی گراد	25درجه سانتی گراد	1/5 میلیمتری
130درجه‌سانتی گراد	172درجه‌سانتی گراد	25 درجه‌سانتی گراد	2 میلیمتری

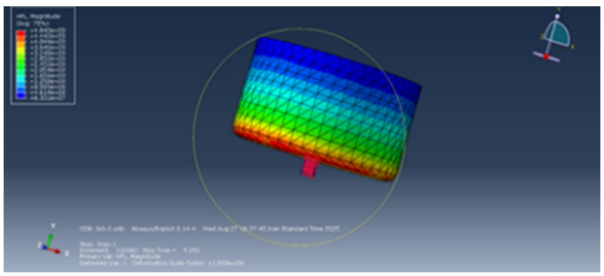
در شکل(9) نیز دمای ابزار در لحظه پایان فرایند نشان داده شده است که بالاترین دما در سطح تماس پین و ماده مشاهده می‌شود. برای تحلیل رفتار در سرعت‌های بالاتر، شبیه‌سازی با سرعت چرخش 1800 دور بر دقیقه نیز انجام شد (شکل‌های 10 و 11). نتایج حاکی از افزایش قابل توجه دمای ماکزیمم تا حدود 420 °C در این سرعت است که می‌تواند باعث رشد دانه‌ها و افت خواص مکانیکی گردد.



شکل7- توزیع دما در پایان جوشکاری برای نمونه جوشکاری شده با عمق شیار 1/5 میلیمتری.



شکل8- نمودار توزیع دمای نمونه شبیه‌سازی شده.



شکل 9- توزیع دما ابزار در پایان جوشکاری در سطح مقطع نمونه جوشکاری شده در عمق 1/5میلیمتری.

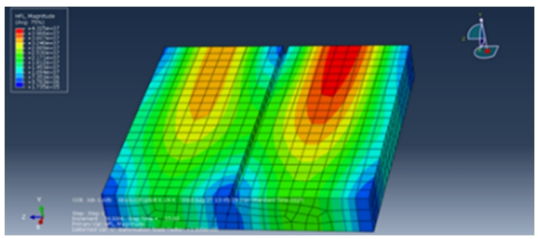
جهت مشاهده شیب دمایی برای نمونه با سرعت‌های بالا، سرعت شبیه‌سازی تا1800 دور بردقیقه در نرم‌افزار اعمال گردید که در شکل‌های(10 و 11) نشان داده شده است.

تصاویر ماکروسکوپی نمونه‌های ترمیم شده با عمق شیارهای متفاوت (0/5، 1، 1/5، 2میلیمتری) که به ترتیب در شکل‌های (12، 13، 14 و 15) نشان داده شده است. این تصاویر به

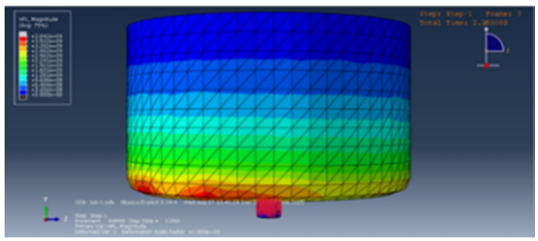
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.07]

صورت کامپوزیت بوده و از ترکیب حداقل 40 فریم عکس ریزساختاری مجزا تشکیل شده است. نتایج نشان داد که در تمامی نمونه‌ها، ترک‌های مصنوعی اولیه به‌طور کامل حذف شده‌اند. این امر نشان‌دهنده جریان مؤثر ماده از نواحی اطراف به درون شیار و پر شدن کامل فضای خالی است. در عمق‌های کمتر از 1 میلی‌متر، ماده به‌خوبی روان شده اما مقدار حرارت تولیدی کمتر بوده است، در حالی که در عمق‌های بیشتر از 1,5 میلی‌متر، افزایش تنش و دمای موضعی احتمال تشکیل حفره و عیوب داخلی را افزایش داده است. ساختار اولیه BM دارای دانه‌های کشیده و لایه‌ای است که ناشی از عملیات نورد و پیرسختی قبلی می‌باشد (شکل 16). پس از فرایند FSW، سه ناحیه مجزا قابل تشخیص‌اند: SZ، TMAZ و BM.

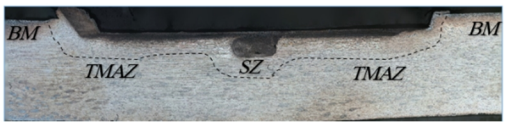


شکل10- بالا رفتن دمای ورق آلومینیومی در سرعت 1800 دور بردقیقه.



شکل11- شیب دمایی در نمونه 1/5 میلیمتری در سرعت 1800 دور بردقیقه.

تصاویر ماکروسکوپی نمونه‌های ترمیم شده با عمق شیارهای متفاوت (0/5، 1، 1/5، 2 میلیمتری) که به ترتیب در شکل‌های 12، 13، 14 و 15 نشان داده شده است. این تصاویر به صورت کامپوزیت بوده و از ترکیب حداقل 40 فریم عکس ریزساختاری مجزا تشکیل شده است. نتایج نشان داد که در تمامی نمونه‌ها، ترک‌های مصنوعی اولیه به‌طور کامل حذف شده‌اند. این امر نشان‌دهنده جریان مؤثر ماده از نواحی اطراف به درون شیار و پر شدن کامل فضای خالی است. در عمق‌های کمتر از 1 میلی‌متر، ماده به‌خوبی روان شده اما مقدار حرارت تولیدی کمتر بوده است، در حالی که در عمق‌های بیشتر از 1,5 میلی‌متر، افزایش تنش و دمای موضعی احتمال تشکیل حفره و عیوب داخلی را افزایش داده است. ساختار اولیه BM دارای دانه‌های کشیده و لایه‌ای است که ناشی از عملیات نورد و پیرسختی قبلی می‌باشد (شکل 16). پس از فرایند FSW، سه ناحیه مجزا قابل تشخیص‌اند: SZ، TMAZ و BM.



شکل12- درشت ساختار نمونه ترمیم شده با شیار به عمق 0/5 میلیمتر.



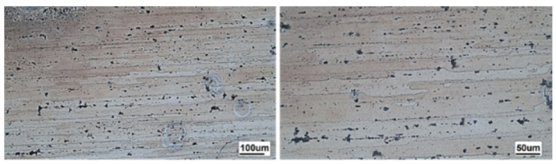
شکل13-درشت ساختار نمونه ترمیم شده با شیار به عمق 1 میلیمتر.



شکل14-درشت ساختار نمونه ترمیم شده با شیار به عمق 1/5 میلیمتر.



شکل15-درشت ساختار نمونه ترمیم شده با شیار به عمق 2 میلیمتر.



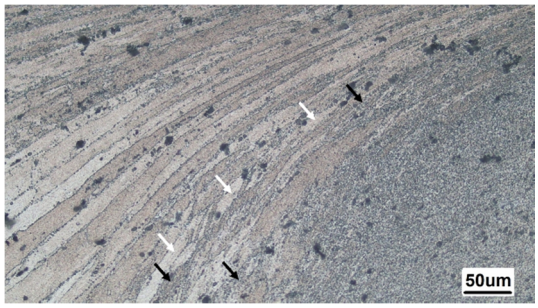
شکل16- ریز ساختار فلز پایه در بزرگنمایی‌های مختلف.

در شکل‌های(17 تا 20)، ریزساختار ناحیه TMAZ برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. در این ناحیه، تبلور مجدد دینامیکی به‌صورت جزئی (حضور همزمان دانه‌های تغییر شکل‌یافته و دانه‌های ریز تبلور مجددی) انجام شده است و دانه‌ها ساختاری تغییرشکل‌یافته با مرزهای خمیده دارند. این موضوع بیانگر این است که میزان گرما و کرنش پلاستیک برای بازآرایی کامل ساختار کافی نبوده است. برای نشان دادن وقوع

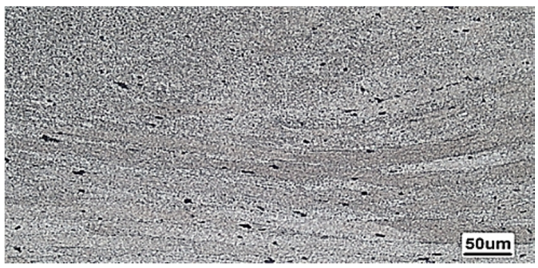
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.07]

تبلور مجدد جزئی در شکل(17)، دانه‌های تغییر شکل یافته و دانه‌های ریز تبلور مجددی به ترتیب به وسیله پیکان‌های سفید و مشکی مشخص شده‌اند.



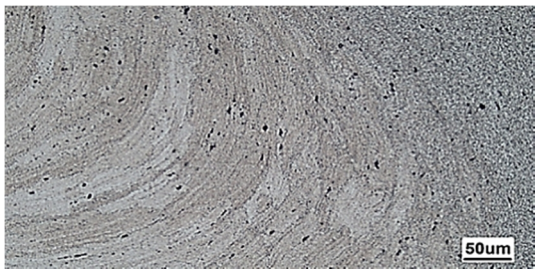
شکل17- ریزساختار TMAZ در نمونه با شیار به عمق 0/5 میلیمتر.



شکل18- ریزساختار TMAZ در نمونه با شیار به عمق 1 میلیمتر.

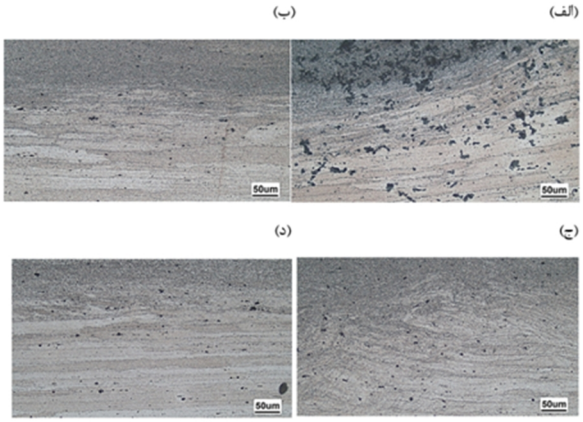


شکل19- ریزساختار TMAZ در نمونه با شیار به عمق 1/5 میلیمتر.

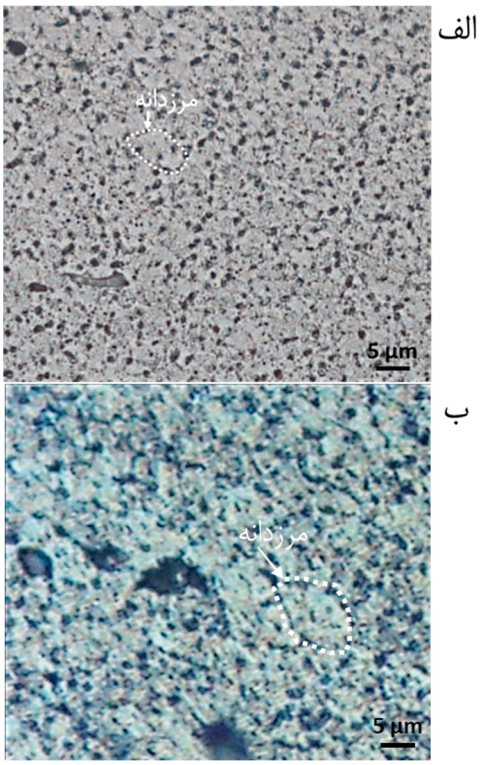


شکل20-ریزساختار TMAZ در نمونه با شیار به عمق 2 میلیمتر.

در SZ، دانه‌های هم‌محور و بسیار ریز مشاهده شد (شکل 21). این ناحیه تحت اثر تبلور مجدد دینامیکی کامل قرار گرفته است. با توجه به تصاویر در بزرگنمایی بالاتر (شکل 22)، اندازه دانه‌ها در نمونه با عمق شیار 1 میلی‌متر کمترین مقدار را داشته و در این حالت ریزترین ساختار ثبت شده است. افزایش عمق تا 1,5 میلی‌متر سبب رشد نسبی دانه‌ها شده که به دلیل افزایش دمای موضعی و زمان نگهداری حرارتی است.



شکل21-ریزساختار ناحیه فوق ریز دانه در ناحیه زیر شولدر در نمونه‌های ترمیم شده با شیارهای به عمق: الف- 0/5میلیمتر، ب- 1 میلیمتر و ج- 1/5 میلیمتر د- 2 میلی‌متر.



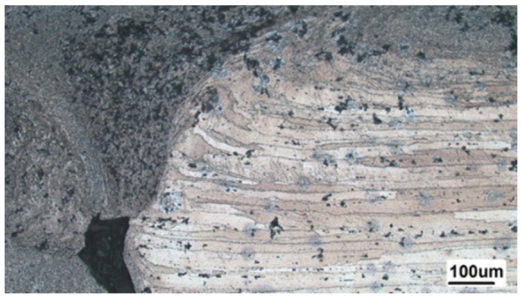
شکل22- ریزساختار sz نمونه 1 الف- 1,5 میلیمتر
ب- در دو بزرگنمایی مختلف.

ذرات تیره مشاهده‌شده در تصاویر میکروسکوپی نوری، بر اساس گزارش‌های موجود درباره آلیاژ AA7075، عمدتاً شامل فازهای بین‌فلزی پایدار نظیر S-phase (Al_2CuMg)،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.07]

فازهای آهن‌دار Al_7Cu_2Fe و در برخی موارد فازهای T ($Al_2Mg_3Zn_3$) هستند. رسوبات ریز سخت‌کننده (η' و GP zones) به دلیل ابعاد نانومتری، در میکروسکوپ نوری قابل مشاهده نیستند [18-16]. در بزرگنمایی بالاتر (شکل 22)، توزیع رسوبات غنی از روی و منیزیم بین مرز دانه‌ها قابل مشاهده است که حاصل ترکیب شیمیایی آلیاژ 7075 می‌باشد. این رسوبات می‌توانند به‌عنوان موانع حرکت نابجایی‌ها عمل کرده و استحکام را افزایش دهند.

در نمونه‌های 0,5 و 2 میلی‌متر، تعدادی حفره ریز مشاهده شد (شکل‌های 23 و 24) که احتمالاً ناشی از جدایش موضعی ماده یا تهویه ناکامل حین اغتشاش است. این عیوب با کاهش استحکام کششی و تمرکز تنش در محل جوش مرتبط هستند [21-19].

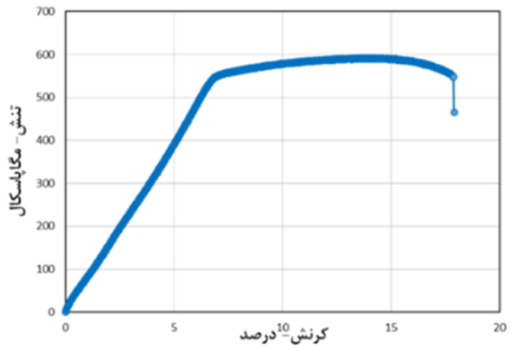


شکل 23-حفره‌های قابل مشاهده در نمونه 0/5 میلیمتری.

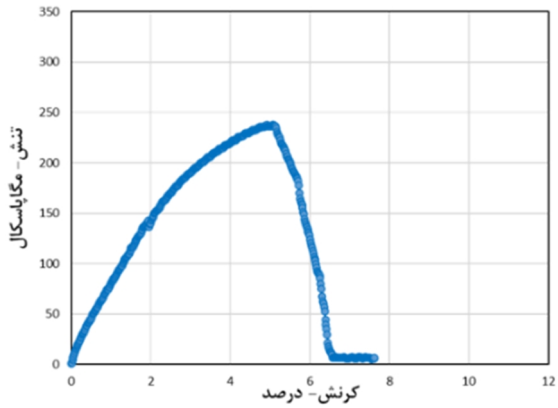


شکل24-حفره‌های قابل مشاهده در نمونه 2 میلیمتری.

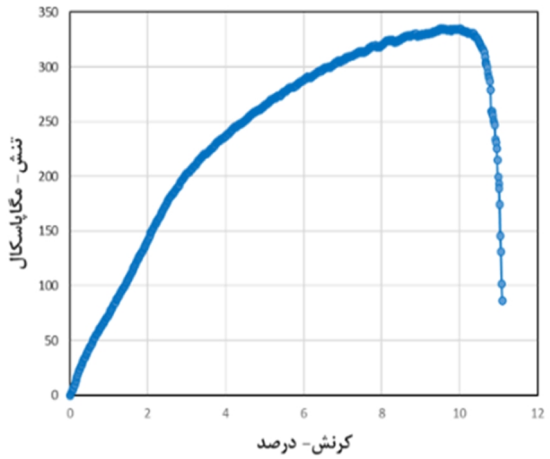
نمودارهای تنش–کرنش مهندسی نمونه‌ها در شکل‌های(25 تا 29) ارائه شده‌اند. فلز پایه (شکل 25) دارای بیشینه استحکام کششی حدود 600 MPa و کرنش شکست 17,9% بوده است. در نمونه‌های ترمیم‌شده، مقدار استحکام کششی نهایی (UTS) و کرنش شکست کاهش یافته اما در نمونه‌های با شیار 1 و 1,5 میلی‌متر نسبت به سایرین بهبود نسبی مشاهده می‌شود. این افزایش استحکام در نمونه‌های میانی را می‌توان به ریزدانگی حاصل از تبلور مجدد دینامیکی نسبت داد. بر اساس رابطه هال-پچ [23-22]، کاهش اندازه دانه سبب افزایش مقاومت تسلیم و در نهایت استحکام کششی می‌شود. در مقابل، وجود حفره‌ها در نمونه‌های 0,5 و 2 میلی‌متر موجب افت خواص شده است.



شکل25- نمودار تنش کرنش رسم شده مهندسی از فلز پایه.



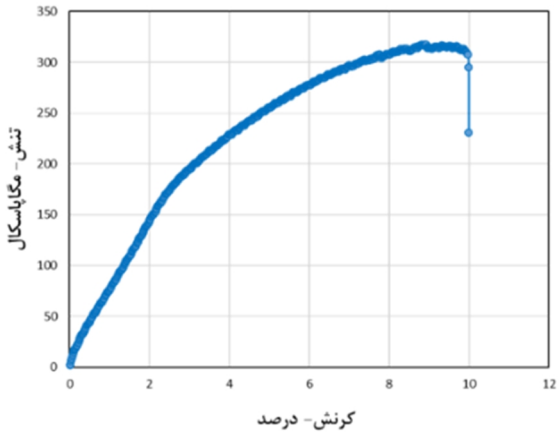
شکل26-نمودار تنش کرنش نمونه 0/5میلمتری.



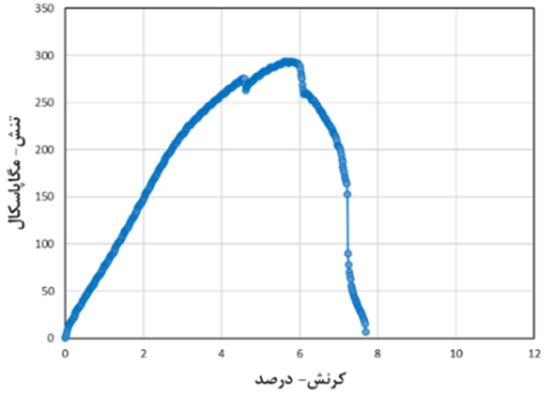
شکل27-نمودار تنش کرنش نمونه 1 میلیمتر.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.07]



شکل28-نمودار تنش کرنش نمونه 1/5 میلیمتر.



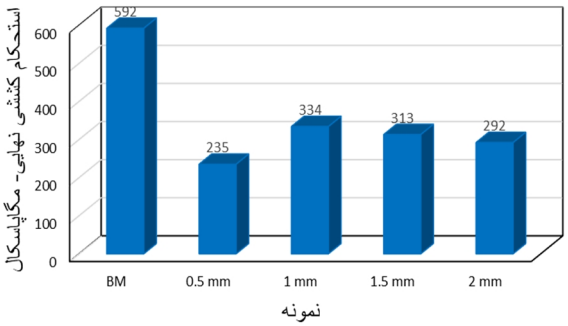
شکل29- نمودار تنش کرنش نمونه 2 میلیمتر.

نمونه‌های آزمون کشش پس از شکست در شکل 30 نشان داده شده‌اند. شکست در نمونه‌های 0,5 و 2 میلی‌متر در مرکز ناحیه جوش رخ داده است، در حالی که در نمونه‌های 1 و 1,5 میلی‌متر شکست از ناحیه‌ی مرزی بین فلز پایه و ناحیه جوش اتفاق افتاده که بیانگر اتصال کامل و سالم در مرکز جوش است.

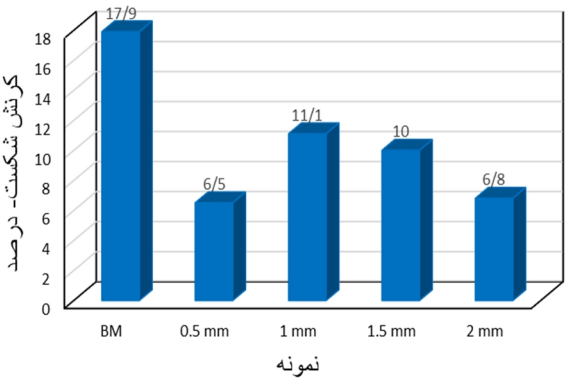


شکل30-تصویر نمونه‌ها بعد از تست کشش.

مقایسه‌ی استحکام کششی نهایی و کرنش شکست برای تمام نمونه‌ها در شکل‌های 31 و 32 آورده شده است. بیشترین استحکام مربوط به نمونه با شیار 1 میلی‌متر و کمترین مقدار به نمونه با شیار 2 میلی‌متر اختصاص دارد.



شکل31- مقایسه استحکام کششی نهایی فلز پایه و نمونه‌های ترمیم شده با شیارهای به عمق متفاوت.

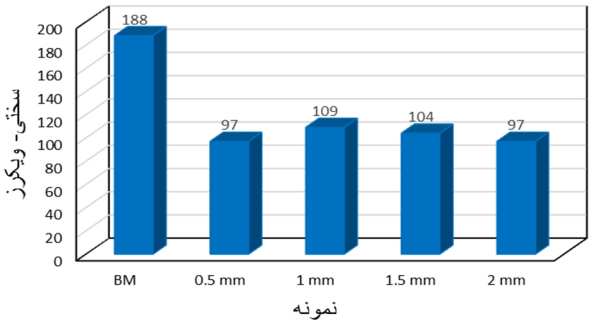


شکل32- مقایسه کرنش شکست فلز پایه و نمونه های ترمیم شده با شیارهای به عمق متفاوت.

نتایج سختی‌سنجی ناحیه همزده در شکل 33 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی در نمونه با شیار 1 میلی‌متر به دلیل رفع عیوب و ریزدانه شدن (طبق رابطه هال-پچ) به بیشترین مقدار (حدود 109 ویکرز) رسیده و با افزایش عمق تا 1,5 میلی‌متر، به دلیل رشد دانه (شکل 22) اندکی کاهش یافته است. در عمق‌های کم‌تر (0,5 میلی‌متر) و بیش‌تر (2 میلی‌متر) به‌دلیل توزیع غیر یکنواخت حرارت و ایجاد عیوب ریز، مقدار سختی به حدود 97 HV کاهش یافته است. این روند بیانگر آن است که افزایش عمق شیار تا حد بهینه 1 میلی‌متر موجب بهبود خواص مکانیکی و ریزساختاری

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.07]

می‌شود، در حالی که عمق‌های بیشتر باعث تمرکز حرارتی، رشد دانه‌ها و کاهش استحکام و سختی خواهد شد.



شکل 33- مقایسه سختی ناحیه مرکزی جوش (SZ) فلز پایه و نمونه های ترمیم شده با شیارهای به عمق متفاوت.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای ترمیم شیارهای مصنوعی با عمق‌های مختلف (0,5، 1، 1,5 و 2 میلی‌متر) در آلیاژ آلومینیوم 7075 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داد که این فرایند قادر است ترمیم کامل شیارها را بدون ایجاد عیب سطحی یا تخلخل مؤثر انجام دهد.

تحلیل ریزساختاری حاکی از آن بود که در ناحیه همزده به‌دلیل تبلور مجدد دینامیکی، ساختاری ریزدانه و همگن ایجاد شده است که موجب بهبود خواص مکانیکی شده است. بیشترین بهبود در نمونه با شیار 1 میلی‌متر مشاهده گردید؛ به‌طوری که این نمونه دارای بالاترین سختی (حدود 109 ویکرز) و استحکام کششی نسبت به سایر نمونه‌ها بود.

در مقابل، نمونه‌های با عمق 0,5 و 2 میلی‌متر به‌دلیل دمای کمتر یا جریان غیریک‌نواخت ماده، دچار ایجاد حفره و کاهش استحکام کششی شدند. همچنین در نمونه 1,5 میلی‌متر نیز اندکی کاهش سختی مشاهده شد که می‌تواند ناشی از رشد مجدد دانه‌ها پس از تبلور مجدد باشد.

به‌طور کلی، نتایج نشان داد که عمق شیار 1 میلی‌متر به‌عنوان شرایط بهینه برای ترمیم ترک‌ها در آلیاژ آلومینیوم 7075 در نظر گرفته می‌شود، زیرا تعادلی مناسب میان دمای فرایند، جریان ماده، ریزدانه‌شدن و استحکام نهایی برقرار می‌سازد.

منابع

1- Mahadevan, R., et al., Intelligent welding by using machine learning techniques. Materials Today: Proceedings, 2021. 46: p. 7402-7410.

2- Singh, S., et al., Analysis of wear and hardness during surface hardfacing of alloy steel by thermal spraying, electric arc and TIG welding. Materials Today: Proceedings, 2022. 50: p. 1599-1605.

3- Yang, Y., et al., Research progress on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded AlLi alloy joints. Journal of Manufacturing Processes, 2022. 82: p. 230-244.

4- Sajed, M. and S.H. Seyedkashi, 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, 2020. 31: p. 467-477.

5- Shraim, A.M., et al., Determination of total flavonoid content by aluminum chloride assay: A critical evaluation. Lwt, 2021. 150: p. 111932.

6- Khan, N., S. Rathee, and M. Srivastava, Friction stir welding: an overview on effect of tool variables. Materials Today: Proceedings, 2021. 47: p. 7196-7202.

7- Maddela, N., M. Aluri, and M. Jakirahemed, Study on defects repairing using Friction Stir technologies. Materials Today: Proceedings, 2021. 44: p. 2373-2379.

8- Scheider, I., A. Barbini, and J. dos Santos, Numerical residual strength prediction of stationary shoulder friction stir welding structures. Engineering Fracture Mechanics, 2020. 230: p. 107010.

9- Dhanraj, J.A., et al., A credal decision tree classifier approach for surface condition monitoring of friction stir weldment through vibration patterns. Materials Today: Proceedings, 2021. 46: p. 1127-1133.

10- Gowthaman, P. and B. Saravanan, Determination of weldability study on mechanical properties of dissimilar Al-alloys using Friction stir welding process. Materials Today: Proceedings, 2021. 44: p. 206-212.

11- Unnikrishnan, M., et al., Challenges on friction stir welding of magnesium alloys in automotives. Materials Today: Proceedings, 2023.

12- Ren, X. and C. Chen, Research on mechanical clinching process for dissimilar aluminum alloy sheets with inclined surface. Journal of Manufacturing Processes, 2023. 89: p. 362-370.

13- Tang, Y., et al., Effects of tool rotation direction on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy joints by the synergistically double-sided friction stir welding. Journal of Manufacturing Processes, 2024. 126: p. 109-123.

14- de Viveiros, B.V.G., et al., Welding and galvanic coupling effects on the electrochemical activity of dissimilar AA2050 and AA7050 aluminum alloys welded by Friction Stir Welding (FSW). Electrochimica Acta, 2023. 449: p. 14219

15- Miah, M.H., D.S. Chand, and G.S. Malhi, A novel

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.07]

technique for repairing Keyhole in the aircraft assembly technology employing friction stir additive manufacturing. Materials Today: Proceedings, 2022.
16- Hu T, Ma K, Topping TD, Schoenung JM, Lavernia EJ. Precipitation phenomena in an ultrafine-grained Al alloy. Acta Materialia. 2013 Apr 1;61(6):2163-78.
17- Parakh A, Lee AC, Chariton S, Wang MM, Kiani MT, Prakapenka VB, Gu XW. High pressure deformation induced precipitation in Al–Zn–Mg–Cu alloy (Al7075). Materials Science and Engineering: A. 2022 Sep 15;853:143765.
18- Goswami R, Lynch S, Holroyd NH, Knight SP, Holtz RL. Evolution of grain boundary precipitates in Al 7075 upon aging and correlation with stress corrosion cracking behavior. Metallurgical and Materials Transactions A. 2013 Mar;44(3):1268-78.
19- Heidarzadeh A, Mironov S, Kaibyshev R, Çam G, Simar A, Gerlich A, Khodabakhshi F, Mostafaei A, Field DP, Robson JD, Deschamps A. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. Progress in Materials Science. 2021 Apr 1;117:100752.
20- Zykova AP, Tarasov SY, Chumaevskiy AV, Kolubaev EA. A review of friction stir processing of structural metallic materials: process, properties, and methods. Metals. 2020 Jun 9;10(6):772.
21- Ma ZY. Friction stir processing technology: a review. Metallurgical and materials Transactions A. 2008 Mar;39(3):642-58.
22- Hansen N. Hall–Petch relation and boundary strengthening. Scripta materialia. 2004 Oct 1;51(8):801-6.
23- Pande CS, Cooper KP. Nanomechanics of Hall–Petch relationship in nanocrystalline materials. Progress in Materials Science. 2009 Aug 1;54(6):689-706.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.07]