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

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

Volume 7, Number 2, 2022



Optimization of TIG repair welding process parameters to obtain maximum tensile strength in AZ91C magnesium alloy

M. Aslani, M. Rafiei*

Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Received 23 September 2021 ; Accepted 30 October 2021

Abstract

In this study, in order to modify the weld structure obtained from repair welding of AZ91C magnesium alloy and improvement of tensile strength, input parameters such as current intensity and preheating temperature were optimized for this alloy. T6 heat treatment was separately done befor and after the welding to homogenize the microstructure and improvement of the mentioned properties. Using variance analysis, the accuracy of the models was checked and analyzed. Optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and tensile tests were used to characterize the microstructure and mechanical properties of the repaired parts. The results of microstructural studies showed that the samples 2 (samples that were subjected to T6 heat treatment before and after welding) had continuous precipitates which these precipitates affected the strength due to the interruption of more slip planes and creating stronger barriers in the path of dislocations, resulting the better mechanical properties as compared with samples 1 (samples that were subjected to heat treatment only after welding). Also, by plotting response surface graphs and level diagrams, the highest tensile strength for samples 1 was observed at preheating temperatures of 493 to 513 K and current intensities of 80 to 90 A, and for samples 2 at temperatures of 513 to 553 K and current intensities of 100 to 110 A.

Keywords: Repair welding, TIG, AZ91C, Tensile strength, Design of experiment.

Corresponding Author: m.rafiei@pmt.iaun.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هفتم، شماره2، پاییز و زمستان 1400



بهینه سازی پارامترهای فرایند جوشکاری تعمیری TIG برای دستیابی به حداکثر استحکام کششی در آلیاژ منیزیم AZ91C

مجید اصلانی، مهدی رفیعی *

مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

دریافت مقاله: 1400/07/01؛ پذیرش مقاله: 1400/08/08

چکیده

در این پژوهش به منظور اصلاح ساختار جوش حاصل از جوشکاری تعمیری آلیاژ ریختگی منیزیم AZ91C و بهبود استحکام کششی، پارامترهای ورودی نظیر شدت جریان و دمای پیشگرم برای این آلیاژ بهینه‌سازی و همچنین عملیات حرارتی T6 نیز به صورت مجزا جهت همگن نمودن ریزساختار و بهبود خواص قبل و بعد از جوشکاری اعمال گردید. با استفاده از آنالیز واریانس، صحت مدل‌ها بررسی و تحلیل شدند. از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف سنجی توزیع انرژی اشعه ایکس (EDS) و آزمون کشش به منظور مشخصه یابی ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات ترمیم شده استفاده شد. نتایج بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که نمونه‌های2 (نمونه‌هایی که قبل و بعد از جوشکاری تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفتند) دارای رسوبات پیوسته بوده که این رسوبات به دلیل قطع بیشتر صفحات لغزش و ایجاد موانع مستحکم‌تر در مسیر حرکت نابجایی‌ها، استحکام را تحت تاثیر خود قرار داده و در مقایسه با نمونه‌های 1 (نمونه‌هایی که تنها بعد از جوشکاری تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند) خواص مکانیکی بهتری از خود نشان دادند. با رسم گراف‌های سطح پاسخ و نمودارهای تراز، بیشترین مقدار استحکام کششی نمونه‌های 1 در دماهای پیشگرم 493 تا 513 درجه کلوین و شدت جریان 80 تا 90 آمپر و برای نمونه‌های2 در دماهای 513 تا 553 درجه کلوین و شدت جریان 100 تا 110 آمپر مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: جوشکاری تعمیری، TIG، AZ91C، استحکام کششی، طراحی آزمایش.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m.rafiei@pmt.iaun.ac.ir

1- مقدمه

آلیاژهای منیزیم نسبت به دیگر آلیاژها و به‌خصوص آلیاژهای آلومینیوم تحت شرایط یکسان، دارای انعطاف‌پذیری کمتری می‌باشند و چگالی آن‌ها تحت شرایط یکسان نسبت به فلزات دیگر کمتر است، اما با طراحی هوشمند و دقیق می‌توان آن‌ها را ارتقاء بخشید، به گونه‌ای که از بسیاری از فلزات با وزن بالاتر، پیشی بگیرند [1]. به دلیل قابلیت ریخته‌گری خوب در دمای محیط، پایداری مناسب در ابعاد و قابلیت جذب عالی ارتعاشات، این آلیاژها، امکان استفاده وسیع در صنایع هوافضا و خودروسازی را دارند [2].

در بیشتر سیستم‌های آلیاژی منیزیم، با افزایش عناصر آلیاژی، محدوده انجماد افزایش می‌یابد و منجر به تمایل به ترک گرم حین جوشکاری می‌شود و دمای ذوب، رسانایی حرارتی و الکتریکی کاهش می‌یابند. با وجود قابلیت ریخته‌گری خوب

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]

آلیاژهای AZ91C، از لحاظ اقتصادی و یا توانایی ریخته‌گری، امکان ریخته‌گری قطعات پیچیده منیزیم وجود ندارد. از این‌رو برای کاربردی کردن بیشتر این آلیاژ، تکنولوژی اتصال در آن از اهمیت بالایی برخوردار است [3 و 4].

در مورد نحوه جوشکاری قطعات منیزیمی با روش‌های مختلف به خصوص روش اصطکاکی اغتشاشی، قوس‌پلاسما و قوسی با الکترود تنگستن (GTAW) بررسی‌هایی انجام شده است اما در مورد ترمیم عیوب قطعات ریخته‌گری شده منیزیمی و حصول بیشینه استحکام کششی با استفاده از فرایند GTAW و اثر پارامترهای ورودی نظیر شدت جریان و دمای پیشگرم بر خواص آن نیاز به تحقیق و بررسی بیشتری است [5]. حضور رسوبات β-$Mg_{17}Al_{12}$ با نقطه ذوب پایین در ریزساختار آلیاژهای منیزیم، علاوه بر تشکیل انواع ترکیبات ناشی از حضور عنصر سوم، با توجه به نوع آلیاژ منیزیم باعث تشکیل منطقه خمیری وسیع و ایجاد فازهای مذاب در مرزدانه‌های این آلیاژها پس از جوشکاری ترمیمی شده که ایجاد انواع ترک‌های گرم را در ناحیه ترمیمی محتمل می‌کند[6].

روش‌های متفاوتی در آلیاژهای منیزیم جهت حذف ساختارهای دندریتی و بهبود ریز ساختار به‌کار گرفته شده است. کائو و همکارانش روی تاثیر پارامتر سرعت جوشکاری بر ساختارهای دندریتی حاصل از جوشکاری لیزر آلیاژ ریختگی منیزیم مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت جوشکاری، ساختاری مسطح همراه با دانه‌های هم‌محور در فصل مشترک ناحیه ذوب و متاثر از حرارت به وجود می‌آید [7].

رز و همکاران با استفاده از جریان پالسی حین جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ آلیاژ AZ61 نشان دادند که افزایش فرکانس و کاهش زمان بین پالسی به نحو موثری سبب از بین رفتن ساختار دندریتی می‌شود [8]. لو و همکارانش روی تاثیر افزایش قابلیت جوانه‌زایی جهت حذف ساختارهای ریختگی دندریتی تحقیقی انجام دادند و با افزودن پودر تیتانیوم به ناحیه اتصال در حین جوشکاری نقطه‌ای توانستند با افزایش قابلیت جوانه‌زنی، به ریزساختاری تقریباً هم‌محور دست پیدا کنند [9].

عملیات حرارتی نیز یکی دیگر از روش‌های بهبود ساختار جوش آلیاژهای منیزیم است که این عملیات باعث ذوب مجدد و حل شدن شبکه خشن یوتکتیکی β-$Mg_{17}Al_{12}$ در ناحیه متاثر از حرارت جوش شده که باعث افزایش استحکام و انعطاف‌پذیری منطقه جوش می‌شود. آدامیک و همکاران ساختار جوش را قبل و بعد از جوشکاری قوسی تنگستن مورد عملیات همگن‌سازی قرار دادند که منجر به حذف ترک‌های گرم و حل‌شدن فاز $Mg_{17}Al_{12}$ لایه‌ای شد [10].

با توجه‌به زیاد بودن تعداد پارامترها و محدوده وسیع هرکدام در فرایند جوشکاری تعمیری TIG استفاده از روش‌های طراحی آزمایش برای رسیدن به خواص (استحکام کششی نهایی) مطلوب بهترین روش از نظر زمانی و اقتصادی است. در میان همه روش‌های طراحی آزمایش، روش طراحی آزمایش سطح پاسخ (RSM) یکی از جدیدترین و بهترین روش‌های طراحی آزمایش به شمار می‌رود که می‌تواند تاثیر همزمان پارامترها را بر استحکام کششی نهایی آلیاژ منیزیم AZ91C به شکل دقیقی نشان دهد [11].

با توجه به اینکه اطلاعاتی در رابطه با بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری تعمیری TIG برای آلیاژ AZ91C در متون علمی مشاهده نشد، هدف از انجام این پژوهش تعیین رابطه بین پارامترهای جوشکاری تعمیری TIG آلیاژ منیزیم و اثر آن‌ها براستحکام کششی نهایی و حصول بیشینه استحکام با پارامترهای بهینه شده با استفاده ازروش طراحی‌آزمایش CCF و به‌کارگیری روش RSM می‌باشد که در نهایت فرایند بهینه‌سازی سطوح متغیرها برای دستیابی به بیشترین استحکام کششی نهایی انجام و حد مطلوب و نقطه بهینه استحکام نهایی کششی در قطعات ترمیم شده با بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری تعمیری TIG حاصل و مدل ریاضی جهت پیش‌بینی و دستیابی به استحکام کششی مورد نظر و یا ناحیه‌ای از فضای فاکتوری را که در آن، پاسخ‌های دارای ماهیت مغایر از سازگاری مناسبی برخوردارند توسط ابزارهای آماری همچون طراحی آزمایش، تحلیل واریانس و آنالیز رگرسیون محاسبه گردید و کیفیت مدل محاسبه شده مورد ارزیابی قرار گرفت [12].

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]

2- مواد و روش تحقیق

2-1- آماده سازی نمونه

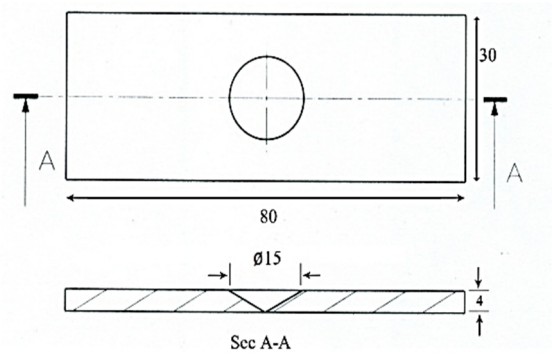
نمونه‌هایی از جنس آلیاژ منیزیم AZ91C توسط دستگاه Sander به ابعاد $4\times30\times80\ mm^3$ تهیه و ترکیب شیمیایی آن نیز توسط آنالیز کوانتومتری (GNR-METALAB-75-80J) مطابق با جدول(1) تعیین گردید. جهت اطمینان از عدم وجود عیوب داخلی، نمونه‌ها تحت آزمون اشعه X به روش فلوروسکوپی نیز قرار گرفتند. سپس در مرحله بعد عیوب مصنوعی مطابق شکل(1)، به صورت حفره مخروطی شکل به قطر 15 mm و با عمق 4 mm روی سطح قطعه ریختگی و در مرکز آن ایجاد گردیدند. با توجه به اینکه یکی از فرضیات این تحقیق مطابق با مطالعات صورت گرفته استحکام و خواص مکانیکی پایین قطعه ریختگی و به دنبال آن مقاومت پایین در برابر تنش‌های حرارتی ناشی از جوشکاری می‌باشد، لذا دو گروه نمونه جهت مطالعه درنظر گرفته شدند: نمونه‌های 1 که فقط بعد از جوشکاری تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفتند و نمونه‌های 2 که قبل و بعد از جوشکاری تحت این عملیات حرارتی قرار گرفتند [13].

جدول1- ترکیب شیمیایی آلیاژ پایه AZ91C

عنصر آلیاژی	Mg	Fe	Zn	Ni	Mn	Al
درصد وزنی	باقیمانده	<۰/۰۵	۰/۵۰	<۰/۰۵	۰/۱۴	۸/۴۴

مهمترین پارامترهای جوشکاری تعمیری TIG شامل شدت جریان ورودی، مقدار ولتاژ، سرعت پیشروی، مدت زمان جوشکاری، دمای پیشگرم و شرایط نمونه ملاک کار قرار گرفت. با توجه به زیاد بودن تعداد پارامترها سه پارامتر شدت جریان، دمای پیشگرم و شرایط نمونه که براساس اطلاعات موجود، پارامترهای موثرتری در فرایند جوشکاری تعمیری TIG هستند به عنوان پارامترهای متغیر و مابقی پارامترها درحین فرایند ثابت در نظر گرفته شدند. مقادیر حدی در روش‌های طراحی آزمایش براساس اطلاعات موجود در مقالات و امکانات کارگاه مشخص شدند. در این آزمایش حد بالا و پایین متغیرها در جدول (2) ارائه شده است. در طراحی آزمایش استفاده شده در این تحقیق تعداد 18 آزمون انجام گرفت.

به علاوه، برای اطمینان بیشتر از صحت روابط بدست آمده و تعیین تقعر و تحدب، نقاط مرکزی نیز با 5 تکرار انجام شد که در مجموع 26 آزمایش انجام گرفت. طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار Design Expert 7.0.0 انجام شد. در جدول (3) پارامترهای هر آزمایش با هر دو مقدار کد شده و واقعی نمایش داده شده‌اند. در این جدول شرایط نمونه1 مربوط به نمونه‌هایی است که فقط بعد از جوشکاری تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفتند و شرایط نمونه 2 مربوط به نمونه‌هایی است که قبل و بعد از جوشکاری تحت این عملیات حرارتی قرار گرفتند.



شکل1- ابعاد نمونه‌ها و عیوب مصنوعی ایجاد شده روی آن (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشند).

جدول 2- شرایط نمونه‌ها، متغیرها و سطوح آن‌ها در آزمایش.

شرایط نمونه	متغیرها	سطوح		
		-۱	۰	۱
۱ و ۲	دمای پیشگرم (کلوین)	۴۷۳	۵۲۳	۵۷۳
	شدت جریان ورودی (آمپر)	۷۰	۹۰	۱۱۰

فرایند جوشکاری توسط دستگاه Fronius Magic Wave 2000 با جریان متناوب همراه با فلز پرکننده ERAZ92A (که فلزپرکننده معمول در جوشکاری آلیاژ AZ91C است) با قطر 4 mm مطابق با استاندارد W28 صورت پذیرفت. جهت ایجاد قوس، از الکترود تنگستن به قطر 1/6 mm همراه با نازل سرامیکی به قطر 4mm و به‌منظور محافظت ازحوضچه مذاب درحین جوشکاری، از دمش گاز آرگون با درجه خلوص 99/99 و با جریان 10 lit/min، استفاده شد. بعد از انجام عملیات جوشکاری جهت بررسی عیوب سطحی و داخلی، به ترتیب آزمون مایع نافذ

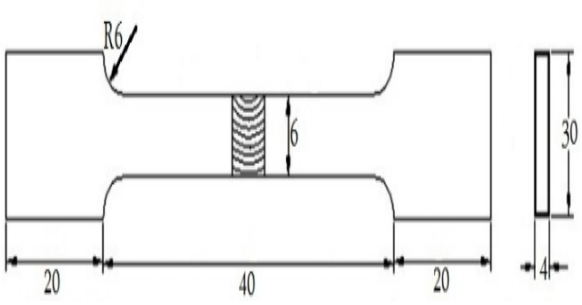
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]

جدول3- مقادیر کد شده و مقادیر واقعی پارامترهای آزمایش

شماره آزمایش	مقادیر کد شده			مقادیر واقعی			استحکام کششی (MPa)
	دمای پیشگرم	شدت جریان	شرایط نمونه	دمای پیشگرم (K)	شدت جریان (A)	شرایط نمونه	
۱	-۱	-۱	۱	۴۷۳	۷۰	۱	۱۴۲/۳۶
۲	۱	-۱	۱	۵۷۳	۷۰	۱	۹۴/۸۹
۳	-۱	۱	۱	۴۷۳	۱۱۰	۱	۱۲۵/۷۰
۴	۱	۱	۱	۵۷۳	۱۱۰	۱	۱۰۷/۱۴
۵	-۱	۰	۱	۴۷۳	۹۰	۱	۱۴۰/۳۰
۶	۱	۰	۱	۵۷۳	۹۰	۱	۱۱۰/۴۰
۷	۰	-۱	۱	۵۲۳	۷۰	۱	۱۴۲/۴۹
۸	۰	۱	۱	۵۲۳	۱۱۰	۱	۱۳۱/۶۰
۹	۰	۰	۱	۵۲۳	۹۰	۱	۱۵۰/۷۰
۱۰	۰	۰	۱	۵۲۳	۹۰	۱	۱۴۲/۷۰
۱۱	۰	۰	۱	۵۲۳	۹۰	۱	۱۳۹/۱۰
۱۲	۰	۰	۱	۵۲۳	۹۰	۱	۱۵۲/۴۰
۱۳	۰	۰	۱	۵۲۳	۹۰	۱	۱۴۴/۶۰
۱۴	-۱	-۱	۲	۴۷۳	۷۰	۲	۱۰۸/۲۹
۱۵	۱	-۱	۲	۵۷۳	۷۰	۲	۱۲۳/۰۰
۱۶	-۱	۱	۲	۴۷۳	۱۱۰	۲	۱۶۰/۹۰
۱۷	۱	۱	۲	۵۷۳	۱۱۰	۲	۱۷۳/۷۰
۱۸	-۱	۰	۲	۴۷۳	۹۰	۲	۱۵۰/۳۰
۱۹	۱	۰	۲	۵۷۳	۹۰	۲	۱۶۵/۶۰
۲۰	۰	-۱	۲	۵۲۳	۷۰	۲	۱۳۶/۵۰
۲۱	۰	۱	۲	۵۲۳	۱۱۰	۲	۱۸۱/۴۰
۲۲	۰	۰	۲	۵۲۳	۹۰	۲	۱۷۲/۷۰
۲۳	۰	۰	۲	۵۲۳	۹۰	۲	۱۶۹/۴۰
۲۴	۰	۰	۲	۵۲۳	۹۰	۲	۱۷۴/۸۰
۲۵	۰	۰	۲	۵۲۳	۹۰	۲	۱۸۱/۲۰
۲۶	۰	۰	۲	۵۲۳	۹۰	۲	۱۷۸/۹۰

و رادیوگرافی ری نمونه‌ها انجام پذیرفت. همچنین جهت بررسی ریزساختار منطقه شکست نمونه‌ها آماده متالوگرافی شدند. برای اچ کردن از محلول اتیلن گلایکل با ترکیب شیمیایی 20ml acetic acid+60ml Ethylene glycol+1ml HNO_3+20ml water به مدت 5 ثانیه استفاده شد. پس از انجام عملیات اچ جهت بررسی ریزساختاری منطقه شکست از میکروسکوپ نوری مدل Olympuse-BX60M ساخت کشور ژاپن استفاده گردید. علاوه بر این، برای بررسی توزیع عناصر آلیاژی و سطوح شکست نمونه‌های آزمایش کشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO-440i ساخت کشور آلمان مجهز به طیف سنج توزیع انرژی اشعه ایکس (EDS) استفاده و تصاویر لازم تهیه گردید.

نمونه‌های آزمایش کشش مطابق با استاندارد ASTM E8M-04 به صورت Sub-Size مطابق شکل(2) تهیه شدند. آزمون کشش به وسیله دستگاه STM-20 ساخت شرکت طراحی و مهندسی سنتام ایران با ظرفیت کشش 2 تن، در شرایط دمای محیط و با سرعت2 mm/min انجام پذیرفت.



شکل2-ابعاد و شکل نمونه آزمایش کشش (اندازه‌ها برحسب میلی‌متر).

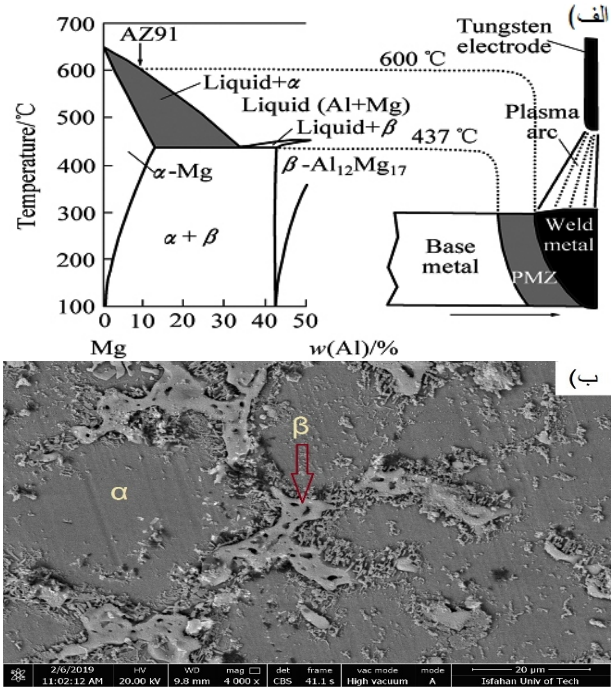
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]

3- نتایج و بحث

3-1- ریز ساختار آلیاژ ریختگی منیزیم AZ91C

باتوجه به نمودار فازی تعادلی منیزیم-آلومینیم (شکل3-الف)، ریز ساختار تعادلی دقیقاً پس از انجماد برای تمامی آلیاژهای AZ91C، شامل فاز α(Mg) و مقدار کمی فاز β می‌باشد که در شکل (3-ب) نیز این موضوع در تصویر SEM نشان داده شده است.



شکل3- الف- نمودار فازی آلیاژ AZ91 و نمایی از تشکیل منطقه ذوب جزئی [14]، ب- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار یوتکتیک و فازهای رسوبی.

فاز β با دو مورفولوژی متفاوت یعنی به صورت یوتکتیک نامنظم فاز β (β یوتکتیک) در محلول جامد α-Mg و همچنین رسوبات ناپیوسته لایه‌ای، در ساختار مشاهده می‌شود. فاز یوتکتیک نامنظم (β یوتکتیک) به دو صورت، کاملاً و جزیی تفکیک شده می‌باشد. در یوتکتیک کاملاً جدا شده دو فاز یوتکتیک به صورت کاملاً مجزا در حین انجماد تشکیل می‌شوند. در این حالت هر منطقه بین دندریتی شامل فاز $Mg_{17}Al_{12}$ بوده که به وسیله فاز α-Mg یوتکتیک که از دندریت‌های اولیه رشد کرده، احاطه شده است و بنابراین ریزساختار آلیاژ ریختگی AZ91C شامل؛ دانه‌های اولیه α-Mg، فاز یوتکتیک (یوتکتیک α-Mg و β) و در نهایت رسوبات لایه‌ایβ می‌باشد.

انجماد آلیاژ AZ91C با جوانه‌زنی منیزیم اولیه (α-Mg) شروع می‌شود. با رشد فاز α-Mg به صورت دندریتی عناصر محلول Al و Zn به داخل مذاب بین دندریت پس زده می‌شوند و در اثر انجماد غیرتعادلی با رسیدن مقدار Al در مذاب بین دندریت به مقدار واکنش یوتکتیک، واکنش انجمادی یوتکتیک که شامل فازهای α غنی از آلومینیم و β-$Mg_{17}Al_{12}$ می‌باشد، در دمای 437 درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود و پس از پایان انجماد فاز α غنی از Al بصورت رسوب‌گذاری ناپیوسته تبدیل به ساختار لایه‌ای α + β می‌گردد که این مطلب به طور عمومی به انجماد یوتکتیک جدا شده معروف می‌باشد[14].

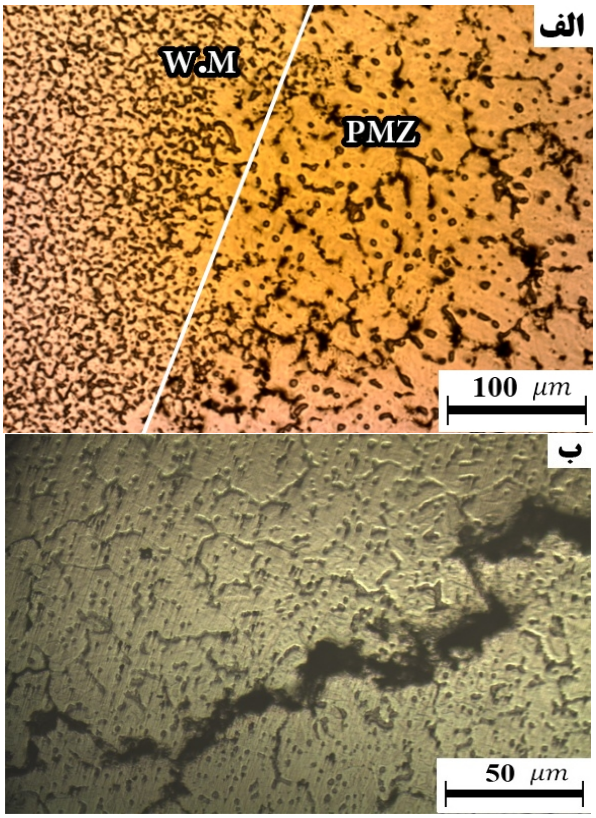
3-2- ریزساختار ناحیه جوش

شکل (4-الف)، تصاویر میکروسکوپ نوری منطقه جوشکاری ذوبی آلیاژ ریختگی AZ91C را نشان می‌دهد. در ناحیه جوش، ذوب کامل اتفاق می‌افتد و مذاب ایجاد شده با سرعت بالایی منجمد می‌شود و با توجه به بالا بودن نرخ سرمایش، ساختار جوش نسبت به آلیاژ پایه ریزتر بوده و مرزدانه‌ها در ناحیه جوش دارای ساختاری غیرهمگن‌تر، شامل فازهای ثانویه ریز و پراکنده β-$Mg_{17}Al_{12}$ و همچنین تیغه‌های خشن یوتکتیکی می‌باشند. دمای واکنش یوتکتیک آلیاژ AZ91 در حدود 437 درجه سانتی‌گراد است. در زیر منطقه ذوب شده، دما پایین‌تر از دمای ذوب کامل آلیاژ یعنی زیر دمای 595 درجه سانتی‌گراد است و به همین دلیل ذوب کامل رخ نداده ولی از آنجایی که افزایش دما به سرعت رخ می‌دهد و ساختار یوتکتیکی نیز در ریز ساختار حضور دارد، در مناطقی از ساختار که دمایی بالاتر از 437 درجه سانتی‌گراد را تجربه می‌کنند انتظار می‌رود واکنش ذوب شدن یوتکتیکی رخ دهد و در ساختار شواهدی مبنی بر ذوب جزیی مشاهده گردد.

با توجه به حضور ذرات فاز β یوتکتیک پیوسته در منطقه ذوب جزیی که به دلیل گرم شدن این منطقه در اثر جوشکاری و پایین بودن نقطه ذوب فاز ثانویه می‌باشد، این ناحیه به عنوان

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]

مکان اصلی ایجاد ترک ذوبی می‌باشد. ترک ذوبی در منطقه PMZ و در زیر خط ذوب اتفاق می‌افتد و می‌تواند در فلز پایه یا فلز جوش گسترش یابد. حرارت ورودی جوشکاری می‌تواند باعث ذوب موضعی زمینه، ترکیبات بین فلزی، ذرات یوتکتیک و ناخالصی‌ها در منطقهPMZ شود [15].



شکل 4- ریزساختار نوری نمونه 1 جوشکاری شده با جریان 140 آمپر، الف- فلز جوش و ب- ترک ذوبی در منطقه PMZ

با عبور منبع حرارتی، مذاب یوتکتیک تشکیل شده از مناطق ذوب شده با گسترش در مرزدانه‌ها یا با تشکیل حوضچه‌های مذاب درون دانه‌ها، شرایطی شبیه ترک گرم به وجود می‌آورد که در شکل(4-ب)، که تحت شرایط با شدت جریان ورودی 140 آمپر جوشکاری شده است، مشخص می‌باشد و از آن به عنوان ترک ذوبی حاصل از ذوب ترکیبات زود ذوب در منطقه PMZ با حضور تنش‌های انقباضی جوشکاری، یاد می‌شود. سطح شکست ترک گرم در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی شکل (5-الف) و (5-ب)، با دو بزرگنمایی متفاوت نشان داده شده است. مورفولوژی دندریتی که مشخصه ترک گرم می‌باشد به خوبی در شکل(5) مشخص است.

3-3- تعیین رابطه استحکام کششی و پارامترهای جوشکاری

برای بدست آوردن رابطه بین مقدار استحکام کششی و پارامترهای جوشکاری تعمیری TIG، از روش سطح پاسخ استفاده شد که بر مجموعه‌ای از معادلات ریاضی و آماری استوار است. براساس نتایج بدست آمده مقدار استحکام کششی نهایی (UTS) تابع دمای پیشگرم (A)، شدت جریان (B) و شرایط نمونه (C) می‌باشد که می‌تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$UTS = f(A, B, C) \quad (1)$$

رابطه پاسخ (استحکام کششی نهایی) با متغیرهای ورودی (متغیرهای جوشکاری تعمیری TIG) در معادله چند جمله‌ای مرتبه دوم روش سطح پاسخ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Y = b_0 + \Sigma b_i x_i + \Sigma b_{ii} x_i^2 + \Sigma b_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

که با توجه به سه جمله متغیر (سه پارامتر متغیر) تعریف شده، چند جمله‌ای در حالت مقادیر کد شده به صورت زیر بسط پیدا می‌کند:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (3)$$

$$UTS = ۱۶۰/۵۸ - ۴/۴۵A + ۱۱/۰۶B + ۱۳/۵۴C + ۳/۴۱AB + ۱۱/۵۸AC + ۱۳/۶۵BC - ۱۸/۷۴A^۲ - ۱۲/۴B^۲ \quad (4)$$

مدل ریاضی برای مقادیر واقعی متغیرهای مستقل به شرح زیر می‌باشد:

شرایط نمونه‌ها:1

$$UTS = -۲۴۳۶/۲۴ + ۷/۲۱A + ۳/۶۷B + ۰/۰۰۳AB - ۰/۰۰۷A^۲ - ۰/۰۳۱B^۲ \quad (5)$$

شرایط نمونه‌ها: 2

$$UTS = -۲۲۷۲/۷ + ۷/۶۸A + ۵/۰۳B + ۰/۰۰۳AB - ۰/۰۰۷A^۲ - ۰/۰۳۱B^۲ \quad (6)$$

3-4- بررسی صحت مدل

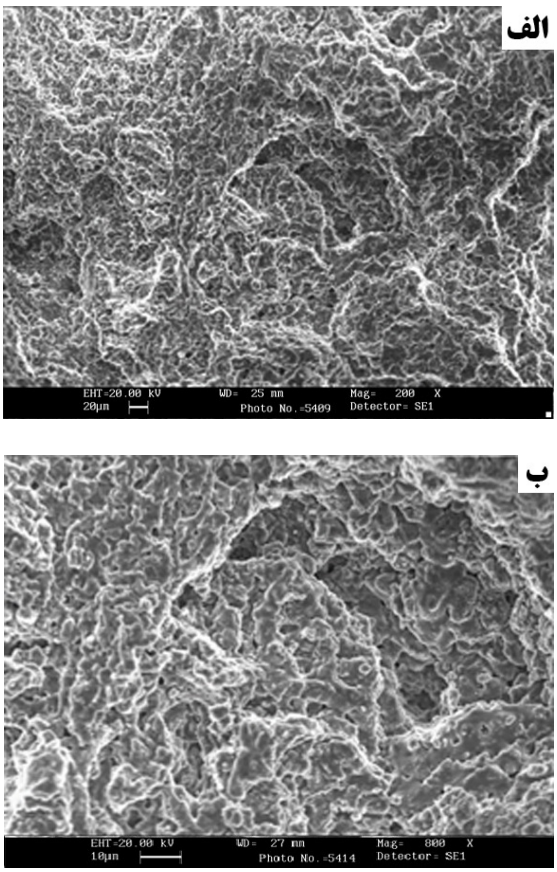
به منظور بررسی کفایت و صحت روابط به دست آمده، ابتدا نتایج حاصل از آنالیز واریانس (ANOVA) مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است در این پژوهش مقدار سطح اطمینان برابر 95% در نظر گرفته شد. با مراجعه به جدول(4) مشاهده می‌گردد مقدار P مدل حاصل کمتر از 0/0001 بوده که نشان از اعتبار بالای مدل به دست آمده (بیشتر از 99/99 درصد) دارد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]

جدول4- آنالیز واریانس (ANOVA)

منابع تغییرات	مجموع مجذورات	درجه آزادی	میانگین مجذورات	مقدار F	مقدار P
مدل	۱۴۸۱۵/۵۱	۸	۱۸۵۱/۹۴	۶۶/۹۶	< ۰/۰۰۰۱
دمای پیشگرم (A)	۲۳۷/۲۷	۱	۲۳۷/۲۷	۸/۵۸	۰/۰۰۹۴
شدت جریان ورودی (B)	۱۴۶۶/۷۸	۱	۱۴۶۶/۷۸	۵۳/۰۳	< ۰/۰۰۰۱
شرایط نمونه (C)	۴۷۶۷/۴۳	۱	۴۷۶۷/۴۳	۱۷۲/۳۸	< ۰/۰۰۰۱
AB	۹۲/۷۵	۱	۹۲/۷۵	۳/۳۵	۰/۰۸۴۶
AC	۱۶۰۹/۶۲	۱	۱۶۰۹/۶۲	۵۸/۲۰	< ۰/۰۰۰۱
BC	۲۲۳۴/۵۱	۱	۲۲۳۴/۵۱	۸۰/۷۹	< ۰/۰۰۰۱
A^2	۱۹۴۰/۷۵	۱	۱۹۴۰/۷۵	۷۰/۱۷	< ۰/۰۰۰۱
B^2	۸۴۸/۸۸	۱	۸۴۸/۸۸	۳۰/۶۹	< ۰/۰۰۰۱
باقیمانده	۴۷۰/۱۷	۱۷	۲۷/۶۶		
فقدان برازش	۲۵۷/۱۷	۹	۲۸/۵۷	۱/۰۷	۰/۴۶۵۷
خطای خالص	۲۱۳/۰۰	۸	۲۶/۶۳		
کل	۱۵۲۸۵/۶۸	۲۵			
C.V. %	۱۴۶/۲	Mean	۵/۲۶	Std. Dev	۳/۶
Predicte R^2	۰/۹۵	Adjusted R^2	۰/۹۷	R^2	۰/۹
	۱۴۸۹/۳۵	PRESS	۲۸/۲۴	Adeq precision	

به عبارت دیگر احتمال اینکه مدل به صورت تصادفی به دست آمده باشد کمتر از 0/01% می‌باشد. توزیع نرمال داده‌ها در نمودار NPP در شکل (6-الف) قابل مشاهده است که صحت نتایج حاصل از آنالیز واریانس را تایید می‌کند. علاوه بر این به منظور بررسی صحت برازش مدل از ضریب تشخیص (R-Squared) استفاده شد. عدد 0/97 برای ضریب تشخیص، کفایت مدل حاصل را تایید می‌کند. به عبارت دیگر97% از اعداد پیش‌بینی با اعداد واقعی (حاصل از نتایج آزمایش کشش) مطابقت داشته است. مقدار ضریب تشخیص همواره بین 0 و 1 قرار داشته و با نزدیک شدن به 1 دقت مدل افزایش می‌یابد. بزرگ بودنR^2 تاییدکننده تطابق رضایت بخش داده‌های آزمایش بر مدل مرتبه دوم است. در این تحقیق، R^2 بزرگ‌تر از 0/97 و ضریب R^2 Adj بالاتر از 0/95 می‌باشد، بنابراین مدل مرتبه دوم بر داده‌ها برازش خوبی داشته است. نمودار مقادیر پیش‌بینی شده برحسب مقادیر واقعی (شکل6-ب) نیز تطابق مقادیر پیش‌بینی شده را با مقادیر اندازه‌گیری شده تایید می‌کند. در نهایت نسبت سیگنال به نویز (دقت کافی) به عنوان آخرین نتیجه استخراج شده از آنالیز واریانس مورد بررسی قرار گرفت.

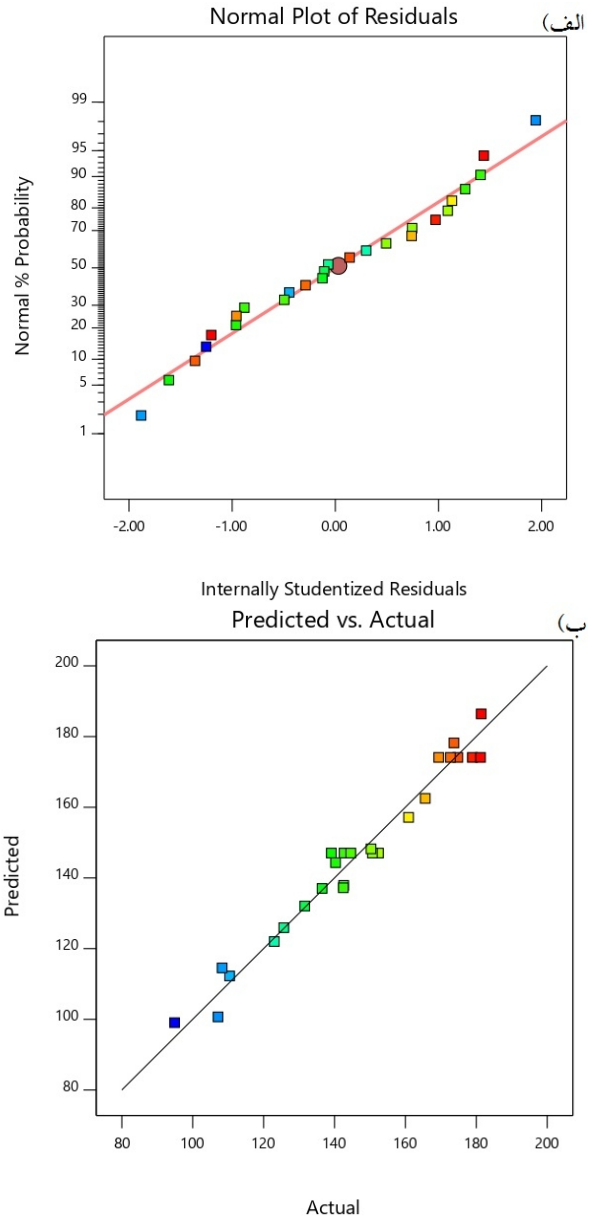


شکل5- تصاویر SEM از مورفولوژی سطح شکست ترک گرم آلیاژ AZ91C (نمونه 1 جوشکاری شده با جریان 140 آمپر) در دو بزرگنمایی مختلف.

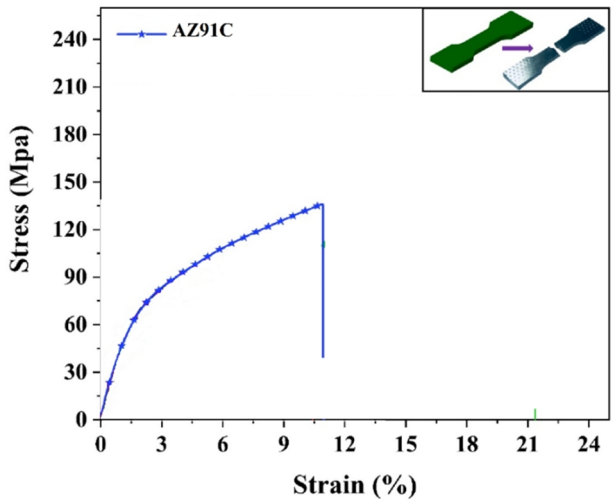
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]

مقدار 28/24 برای نسبت سیگنال به نویز نیز کفایت مدل را تایید می‌کند (مقادیر بزرگ‌تر از 4 قابل قبول است). برای اعتبار سنجی رابطه به دست آمده یک نمونه با پارامترهای تصادفی (شدت جریان 90A، دمای پیشگرم 523K) جوشکاری تعمیری شد و مقدار بیشینه استحکام کششی آن مطابق شکل 7 اندازه‌گیری گردید. با مراجعه به رابطه 5 مقدار استحکام کششی نهایی پیش‌بینی شده، برابر 142/5 MPa می‌باشد که مطابقت نسبتاً خوبی را با داده‌های جدول(3) نشان می‌دهد.



شکل6- بررسی پیش فرض‌های مدل، الف- نمودار احتمال نرمال، ب- نمودار مقادیر پیش‌بینی شده برحسب مقادیر واقعی استحکام کششی.



شکل 7- نمودار تنش-کرنش آلیاژ AZ91C (نمونه 1) جوشکاری شده تحت دمای پیشگرم 523K و شدت جریان 90 A

3-5- تاثیر پارامترهای جوشکاری تعمیری TIG بر مقدار استحکام کششی نهایی (UTS)

در جدول(5) اثرات برآورد شده و ضرایب هر یک اجزای مدل برای متغیر پاسخ آورده شده است. با توجه به ضرایب برآورد شده، در بین اثرات ساده متغیرها، پارامترهای شرایط نمونه، شدت جریان ورودی و دمای پیشگرم به ترتیب بالاترین اثر را بر متغیر واکنش داشتند. در بین کل اثرات موجود در مدل، بالاترین اثر بر استحکام کششی، مربوط به اثر درجه دوم دمای پیشگرم بوده است. بر همکنش شدت جریان ورودی و شرایط نمونه، اثر درجه دوم شدت جریان ورودی، برهمکنش دمای پیشگرم و شرایط نمونه در مراتب بعدی قرار گرفتند.

3-6- بهینه سازی پارامترهای GTAW

با توجه به برآورد ضرایب فاکتورهای آزمایش و موثر بودن پارامترها (مطابق با جدول 5) بر استحکام کششی، با رسم گراف‌های سطح پاسخ و نمودارهای تراز، به راحتی می‌توان شرایط بهینه آزمایش را تشخیص داد. روش سطح پاسخ (RSM)، روشی برای بهینه سازی پارامترهای فرایند است. در این فرایند پارامتر پاسخ در یک مقیاس ثابت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نمودارهای سطح پاسخ، دو پارامتر در محورهای X و Y و پاسخ‌در محور Z به تصویر کشیده شده است که درنهایت نقطه مطلوب را نشان می‌دهد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

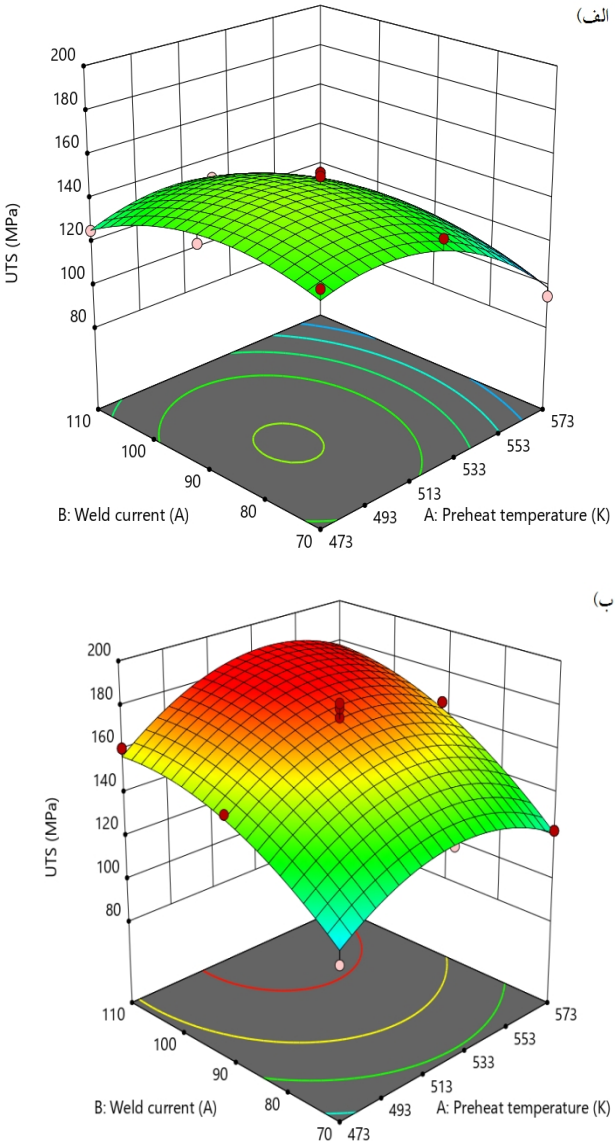
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]

جدول5- برآورد ضرایب فاکتورهای آزمایش

فاکتور	برآورد ضریب	درجه آزادی	خطای استاندارد	حدود اطمینان ۹۵ ٪		ضریب تورم واریانس
				حد پائین	حد بالا	
مدل	۱۶۰/۵۸	۱	۱/۵۴	۱۵۷/۳۲	۱۶۳/۸۳	
دمای پیشگرم (A)	-۴/۴۵	۱	۱/۵۲	-۷/۶۵	-۱/۲۴	۱
شدت جریان ورودی (B)	۱۱/۰۶	۱	۱/۵۲	۷/۸۵	۱۴/۲۶	۱
شرایط نمونه (C)	۱۳/۵۴	۱	۱/۰۳	۱۱/۳۷	۱۵/۷۲	۱
AB	۳/۴۱	۱	۱/۸۶	-۰/۵۱۷۹	۷/۳۳	۱
AC	۱۱/۵۸	۱	۱/۵۲	۸/۳۸	۱۴/۷۸	۱
BC	۱۳/۶۵	۱	۱/۵۲	۱۰/۴۴	۱۶/۸۵	۱
A^2	-۱۸/۷۴	۱	۲/۲۴	-۲۳/۴۷	-۱۴/۰۲	۱/۱۷
B^2	-۱۲/۴۰	۱	۲/۲۴	-۱۷/۱۲	-۷/۶۸	۱/۱۷

شکل(8)، نمودار سطح پاسخ را نشان می‌دهد. شکل (8-الف) نمودار سطح پاسخ سه بعدی از مدل رگرسیونی حاصل شده را در شرایط نمونه 1 نشان می‌دهد. نقاط قرمز، نقاطی هستند که مقادیر واقعی از مقادیر پیش‌بینی شده بیشتر هستند. نقاط صورتی، نقاطی را نشان می‌دهند که مقادیر واقعی کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده هستند. بالاترین استحکام کششی در قله نمودار مشاهده می‌گردد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار استحکام کششی در دمای پیشگرم 493 تا 513 درجه کلوین و شدت جریان 80 تا 90 آمپر مشاهده می‌گردد. شکل (8-ب) نمودار سطح پاسخ سه بعدی از مدل رگرسیونی حاصل شده را با فرض ثابت نگه داشتن شرایط نمونه در شرایط نمونه 2 نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، نقطه بهینه استحکام کششی، زمانی حاصل می‌شود که دمای پیشگرم از 513 تا 553 درجه کلوین و شدت جریان ورودی از 100 تا 110 آمپر باشد.

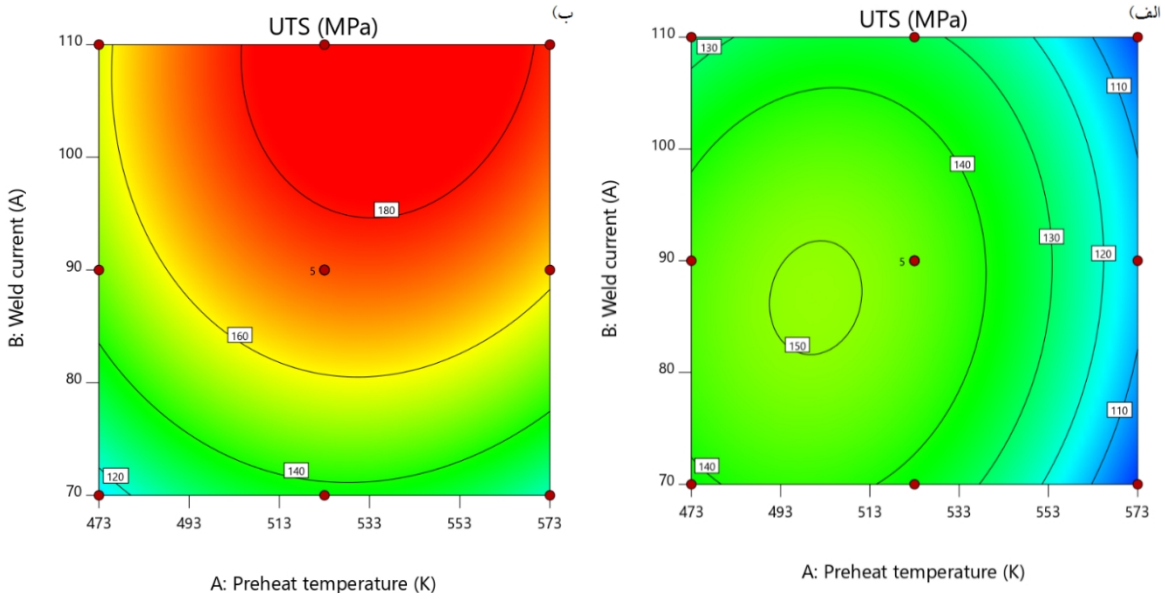
نتایج نمودارهای تراز در شکل(9) آورده شده است. این شکل تغییرات استحکام کششی را با ثابت نگه داشتن شرایط نمونه در شرایط نمونه 1 نشان‌می‌دهد. با افزایش‌دمای پیشگرم تا513 درجه کلوین، میزان استحکام کششی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای پیشگرم از 513 تا 573 درجه کلوین، میزان استحکام کششی به تدریج کاهش می‌یابد. نتایج برای شدت جریان نیز نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان تا 90 آمپر، استحکام کششی‌افـزایش و پس از آن با افـزایش‌شدت‌جریان تا



شکل8- نمودار سطح پاسخ برای استحکام کششی؛ الف- شرایط نمونه 1؛ ب- شرایط نمونه 2.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

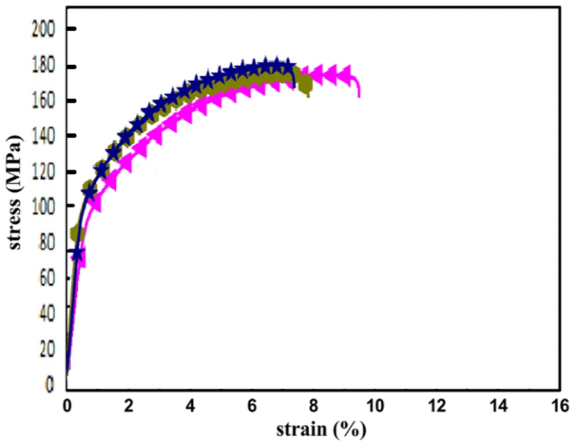
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]



شکل9- نمودارهای تراز برای استحکام نهایی کششی الف- شرایط نمونه 1؛ ب- شرایط نمونه 2.

۱۱۰ آمپر، میزان استحکام کششی به تدریج کاهش می‌یابد. شکل(9) (ب) تغییرات استحکام کششی را با ثابت نگه‌داشتن شرایط نمونه در شرایط نمونه 2 نشان می‌دهد. مطابق نتایج، با افزایش دمای پیشگرم تا 553 درجه کلوین، میزان استحکام کششی افزایش می‌یابد. نتایج برای شدت جریان نیز نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان از 70 تا 110 آمپر، به تدریج استحکام کششی افزایش یافته است.

فرایند بهینه سازی سطوح سه متغیر دمای پیشگرم، شدت جریان ورودی و شرایط نمونه برای دستیابی به بیشترین استحکام کششی انجام شد. کمترین و بیشترین مقدار استحکام کششی به ترتیب 94/89و 181/4 مگاپاسکال بدست آمد. جهت بهینه‌سازی متغیر وابسته، مقدار هدف برای استحکام کششی بیشینه در نظر گرفته شد. پارامترها و محدودیت‌های اعمال شده برای بهینه سازی در جدول(6) آورده شده است. علاوه بر این، 4 عدد از بهترین پاسخ‌های ارائه شده برای مقادیر بهینه متغیرهای مستقل به منظور دستیابی به بالاترین مقدار استحکام کششی در جدول(7) نشان داده شده است. با توجه به نتایج استحکام کششی برای نمونه‌های1و2، نمونه‌های2 دارای میانگین بالاتری از استحکام کششی بوده و لذا شرایط این نمونه‌ها از اهمیت بالاتری برخوردار می باشد. به این‌ترتیب، چنانچه‌دمای پیشگرم 527/79 درجه کلوین، شدت جریان ورودی 107/93 آمپر و شرایط نمونه ۲ درنظر گرفته شود، میزان استحکام کششی ۱۵۷/۱ مگاپاسکال به دست خواهد آمد. مطلوبیت این فرمول، ارزیابی شده است. به این معنی که دستیابی به هدف با استفاده از فرمول مذکور 100% می‌باشد [12]. با توجه به پارامترهای بهینه شده برای نمونه‌های 2، خواص کششی نمونه جوشکاری شده با جریان 110 آمپر و دمای پیشگرم 523 درجه کلوین را مورد بررسی قرارداده و مطابق نمودار تنش-کرنش (شکل10) برای نمونه‌ای که تحت شرایط 2 در شدت جریان 110 آمپر و با دمای پیشگرم 523 درجه کلوین جوشکاری تعمیری انجام شده، شکست در استحکام کششی 181/4 MPa رخ داده است.



شکل 10- نمودار تنش-کرنش آلیاژ AZ91C (شرایط نمونه 2) جوشکاری شده تحت دمای پیشگرم 523K و شدت جریان A 110 (3 مرتبه تکرار)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

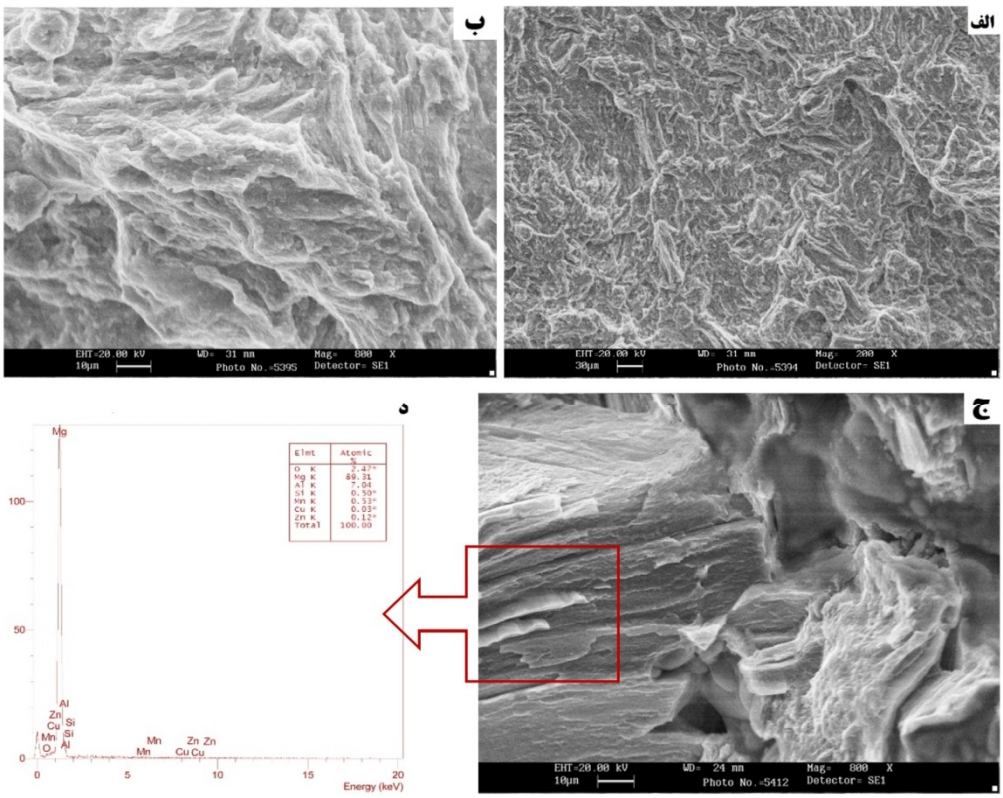
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]

جدول6- محدودیت های اعمال شده پارامترها برای بهینه‌سازی استحکام کششی

پارامتر	هدف	حد پائین	حد بالا	وزن	اهمیت
دمای پیشگرم(K)	در محدوده	۴۷۳	۵۷۳	۱	۳
شدت جریان ورودی(A)	در محدوده	۷۰	۱۱۰	۱	۳
شرایط نمونه	در محدوده	۱	۲	۱	۳
استحکام کششی(MPa)	ماکزیمم	۹۴/۸۹	۱۸۱/۴	۱	۳

جدول 7- بهترین پاسخ‌های ارائه شده برای مقادیر بهینه به منظور دستیابی به بیشترین استحکام کششی در نمونه‌های شماره 2

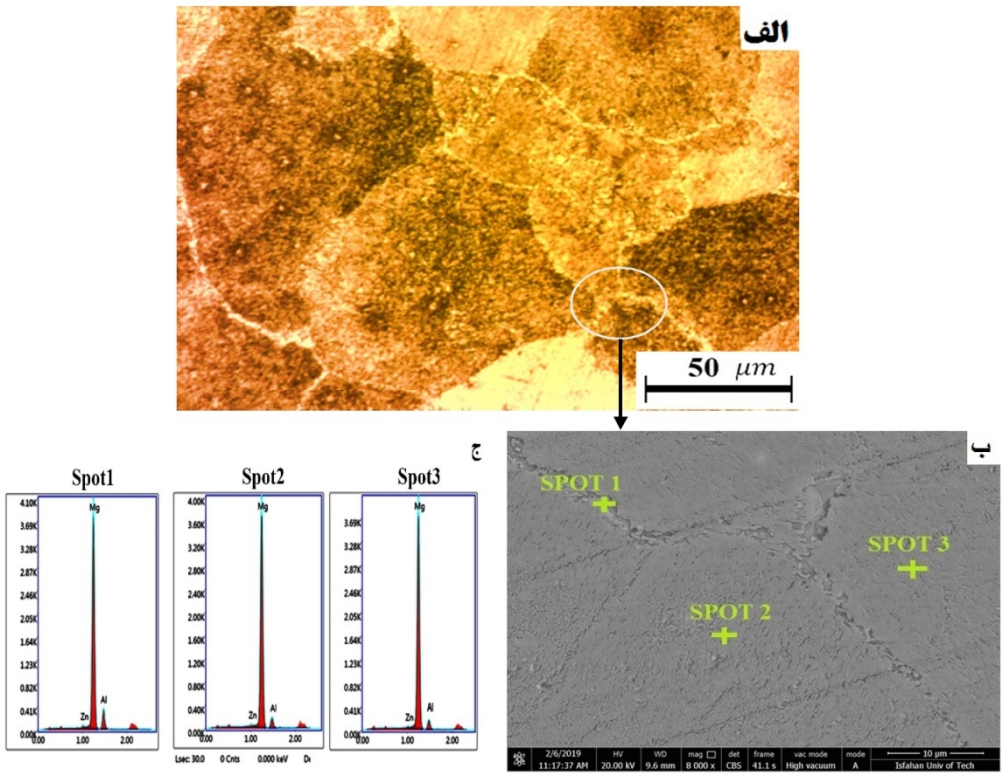
شماره	دمای پیشگرم (K)	شدت جریان ورودی (A)	استحکام کششی (MPa)	مطلوبیت
۱	۵۲۷/۷۹۱	۱۰۷/۹۳۰	۱۸۷/۱۰۴	۱
۲	۵۰۹/۲۵۰	۱۰۸/۰۰۰	۱۸۲/۰۸۶	۱
۳	۵۳۱/۶۶۶	۱۰۶/۷۸۸	۱۸۷/۲۸۷	۱
۴	۵۳۸/۰۰۰	۱۰۸/۰۰۰	۱۸۷/۶۸۱	۱



شکل11- تصاویر SEM سطح شکست و نتایج آنالیز EDS برای نمونه 2، جوشکاری شده با جریان 110 آمپر و دمای پیشگرم 523 درجه کلوین.

با توجه به شکل(11)، با بررسی مورفولوژی سطح شکست و نتایج آنالیز EDS، ملاحظه می‌شود که شکست ترد تورقی از نوع درون دانه‌ای غالب بوده، هرچند در برخی از مناطق، شکست به صورت ترد بین دانه‌ای بوده است. تغییر شکل پلاستیک‌نیز در برخی از نواحی به صورت خطوط سیلان نمایان می‌باشد. مطابق شکل(12)، با بررسی ریزساختار میکروسکوپ نوری نمونه جوشکاری شده با جریان 110 آمپر و دمای پیشگرم 523 درجه کلوین و با توجه به کاهش مقدار آلومینیوم و حل شدن فاز β-$Mg_{17}Al_{12}$ شکست از درون دانه رخ داده است. در واقع با انحلال فاز سخت β در مرزدانه‌ها، استحکام این مناطق نسبت به تنش‌های وارده افزایش یافته که با وجود افزایش استحکام ماده در داخل دانه‌ها توسط رسوب فازهای ثانویه،

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]



شکل 12-الف- ریزساختار میکروسکوپ نوری از سطح مقطع شکست نمونه 2 (جوشکاری شده با جریان 110 آمپر و دمای پیشگرم 523 درجه کلوین)، ب- ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی همین نمونه و ج- نتایج EDS

گسست ماده از داخل دانه‌ها به صورت عمده رخ‌داده که نشانگر افزایش استحکام شکست ماده می‌باشد[16].

مطابق نتایج متالوگرافی برای نمونه 2 (جوشکاری شده با جریان 110 آمپر و دمای پیشگرم 523 درجه کلوین) در شکل(12)، با افزایش حرارت ورودی و کاهش نرخ سرد شدن علی‌رغم رشد دانه به دلیل تجزیه و افزایش رسوبات پیوسته در سرتاسر دانه، ساختاری همگن ایجاد شده است. حضور رسوبات غالب پیوسته در درون دانه‌ها عاملی جهت بهبود ساختار می‌باشد که احتمال ایجاد موانع لغزش نابجایی‌ها را افزایش داده و موجب افزایش تأثیر رسوب سختی در فرایند استحکام دهی شده است. نمودار تنش-کرنش (شکل 10) نیز حاکی از شکست نمونه در تنش‌های بالا می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آلیاژ ریختگی منیزیم AZ91C با استفاده از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز ترمیم و با کنترل شرایط ورودی، ریزساختار اصلاح و عیوب ناشی از تغییر فازها در فلز جوش، برطرف گردید. مهمترین نتایج حاصله به شرح ذیل می‌باشند:

- بررسی نتایج متالوگرافی نمونه‌هایی که قبل و بعد از جوشکاری مورد عملیات T6 قرار گرفتند نشان داد که این نمونه‌ها از ساختارهمگنی برخوردار می‌باشند و حضور رسوبات پیوسته در درون دانه برای این نمونه‌ها عاملی جهت بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی این نمونه‌ها می‌باشد.

- بررسی مورفولوژی سطح شکست نمونه‌هایی که قبل و بعد از جوشکاری مورد عملیات T6 قرار گرفتند نشان داد که شکست ترد تورقی از نوع درون دانه‌ای در این نمونه‌ها غالب می‌باشد. هر چند که شواهدی از شکست نرم نیز دیده شد.

- با رسم گراف‌های سطح پاسخ و نمودارهای تراز، بیشترین مقدار استحکام کششی نمونه‌هایی که فقط بعد از جوشکاری مورد عملیات T6 قرار گرفتند در دماهای پیشگرم 493 تا 513 درجه کلوین و شدت جریان های 80 تا 90 آمپر و برای نمونه‌هایی که قبل و بعد از جوشکاری مورد عملیات T6 قرار گرفتند،در دماهای 513 تا553 درجه کلوین و شدت جریان‌های

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]

100 تا110آمپر مشاهده گردید.

- نتایج نمودارهای تراز برای نمونه‌هایی که قبل و بعد از جوشکاری مورد عملیات T6 قرار گرفتند نشان داد که استحکام کششی، با افزایش دمای پیشگرم تا 553 درجه کلوین میزان افزایش و برای شدت جریان نیز با افزایش جریان از 70 تا 110 آمپر به تدریج افزایش یافت.

منابع

1- K.N. Braszczynska-Malik, M. Mroz, "Gas-tungsten arc welding of AZ91 magnesium alloy", Journal of Alloys and Compounds, 509, pp. 9951-9958, 2011.

2- X. Cao, M. Jahazi, J.P. Immarigeon, W. Wallace, "A review of laser welding techniques for magnesium alloys", Journal of Materials Processing Technology, 171, pp. 188–204, 2006.

3- T. Zhu, Z.W. Chen, W. Gao, "Incipient melting in partially melted zone during arc welding of AZ91D magnesium alloy", Materials Science and Engineering A, 416, pp. 246-252, 2006.

4- D. Min, J. Shen, S. Lai, J. Chen, "Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of tungsten inert gas arc buttwelded AZ61 magnesium alloy plates", Material Characterision, 60, pp.1583-1590, 2009.

5- A.K. Dahle, Y.C. Lee, M.D. Nave, P.L. Schaffer, D.H. StJohn, "Development of the as-cast microstructure in magnesium-aluminium alloys", Journal of Light Metals, 1, pp.61-72, 2001.

6- T.P. Zhu, Z.W. Chen, W. Gao, "Partial melting and re-solidification in partially melted zone during gas tungsten arc welding of AZ91 cast alloy", Trans. Non ferrous Met. Soc. China, 17, pp. 342-346, 2007.

7- P. Cao, D. H. StJohn, M. Qian, "The Effect of Manganese on the Grain Size of Commercial AZ31 Alloy", Materials Science Forum, 488-489, pp. 139-142, 2005.

8- A. Razal Rose, K. Manisekar, V. Balasubramanian, S. Rajakumar, "Prediction and optimization of pulsed current tungsten inert gas welding parameters to attain maximum tensile strength in AZ61A magnesium alloy", Materials and Design, 37, pp. 334-348, 2012.

9- H. Luo, C. Hao, J. Zhang, Z. Gan, H. Zhang, "Characteristics of resistence welding magnesium alloys AZ31 and AZ91", American Welding Society Welding Journals, 90, pp. 249-257, 2011.

10- J. Adamiec, S. Roskosz, R. Jarosz, "Repair of magnesium alloy castings by means of welding and pad welding", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 22, pp. 21-24, 2007.

11- G. Singh, K. Singh, J. Singh, "Modelling of the Effect of Process Parameters on Tensile Strength of Friction Stir Welded Aluminium Alloy Joints", Experimental Techniques, 38(3), pp.63-71, 2014.

12- W.Y. Li, T. Fu, L. Hütsch, J. Hilgert, F.F. Wang, J.F. Dos-Santos, N. Huber, "Effects of tool rotational and welding speed on microstructure and mechanical properties of bobbin-tool friction-stir welded Mg AZ31", Materials & Design, 64, pp.714720, 2014.

13- J.P. Zhou, D.S. Zhao, R.H. Wang, Z.F. Sun, J.B. Wang, J.N. Gui, O. Zheng, "In Situ Observation of Ageing Process and NewMorphologies of Continuous Precipitates in AZ91 Magnesium Alloy", Mat. Lett., 61, pp. 4707-4710, 2007.

14- D. Eliezer, P. Uzan, "The Effect of the β Phase and Heat Treatment on the Corrosion Behavior of Magnesium AZ91 Alloy", Synthesis of Light Weight MetalsIII, The Minerals Metals & Materials Society, pp.171-176, 1999.

15- N.N. Aung, W. Zhou, "Effect of Heat Treatment on Corrosion and Electrochemical Behavior of AZ91D Magnesium Alloy", J. App. Elec. Chem., 32, pp.1397-1401, 2002.

16-J.F. Nie, "Effects of Precipitate Shape and Orientation on Dispersion Strengthening in Magnesium Alloys", Scri. Mat., 48, pp.1009-1015, 2003.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.7.0]