



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 before 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



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 بهینه سازی 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 مدل ها 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 بررسی های ریزساختاری نشان داد که نمونه های 2 (نمونه هایی 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 مستحکم تر در مسیر حرکت نابجایی ها، استحکام را تحت تاثیر خود قرار داده و در مقایسه با نمونه های 1 (نمونه هایی که تنها بعد از جوشکاری تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند) خواص مکانیکی بهتری از خود نشان دادند. با رسم گراف های سطح پاسخ و نمودارهای تراز، بیشترین مقدار استحکام کششی نمونه های 1 در دماهای پیشگرم 493 تا 513 درجه کلوین و شدت جریان 80 تا 90 آمپر و برای نمونه های 2 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.rafaei@pmt.iaun.ac.ir 

1- مقدمه

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 سیستم های آلیاژی منیزیم، با افزایش عناصر آلیاژی، محدوده انجماد افزایش می یابد و منجر به تمایل به ترک گرم حین جوشکاری می شود و دمای ذوب، رسانایی حرارتی و الکتریکی کاهش می یابند. با وجود قابلیت ریخته گری خوب

آلیاژهای منیزیم نسبت به دیگر آلیاژها و به خصوص آلیاژهای آلومینیوم تحت شرایط یکسان، دارای انعطاف پذیری کمتری می باشند و چگالی آنها تحت شرایط یکسان نسبت به فلزات دیگر کمتر است، اما با طراحی هوشمند و دقیق می توان آنها را ارتقاء بخشید، به گونه ای که از بسیاری از فلزات با وزن بالاتر، پیشی بگیرند [1]. به دلیل قابلیت ریخته گری خوب در دمای

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 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ در ناحیه متأثر 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 حل شدن فاز $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ لایه‌ای شد [10].

با توجه به 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 تأثیر 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 بر استحکام کششی نهایی و حصول بیشینه استحکام با پارامترهای بهینه شده با استفاده از روش طراحی آزمایش 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].

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، قوس‌پلاسم و قوسی با الکتروود 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 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 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 مرز دانه‌های 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 تأثیر 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 متأثر 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 تأثیر 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].

2- مواد و روش تحقیق

1-2- آماده سازی نمونه

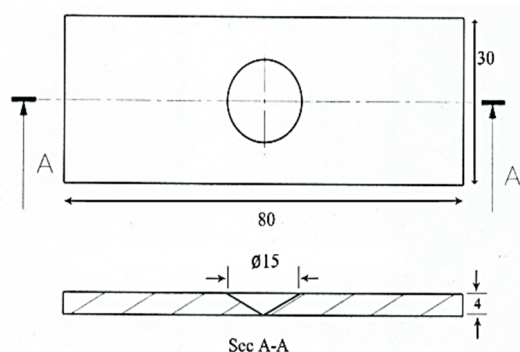
نمونه‌هایی از جنس آلیاژ منیزیم AZ91C توسط دستگاه Sander به ابعاد $4 \times 30 \times 80 \text{ mm}^3$ تهیه و ترکیب شیمیایی آن نیز توسط آنالیز کوانتومتری (GNR-METALAB-75-80J) مطابق با جدول (1) تعیین گردید. جهت اطمینان از عدم وجود عیوب داخلی، نمونه‌ها تحت آزمون اشعه X به روش فلوروسکوپی نیز قرار گرفتند. 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 در نظر 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].

جدول 1- ترکیب شیمیایی آلیاژ پایه AZ91C

عنصر آلیاژی	Mg	Fe	Zn	Ni	Mn	Al
درصد وزنی	باقیمانده	<0.05	0.50	<0.05	0.14	8.44

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 نمونه 1 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.



شکل 1- ابعاد نمونه‌ها و عیوب مصنوعی ایجاد شده روی آن (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشند).

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

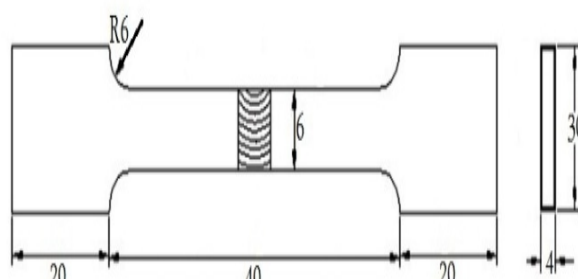
سطوح			متغیرها	شرایط نمونه
۱	۰	-۱		
۵۷۳	۵۲۳	۴۷۳	دمای پیشگرم (کلوین)	۱ و ۲
۱۱۰	۹۰	۷۰	شدت جریان ورودی (آمپر)	

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 الکتروود تنگستن به قطر $1/6 \text{ mm}$ همراه با نازل سرامیکی به قطر 4 mm و به منظور محافظت از حوضچه مذاب در حین 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

جدول 3- 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	شدت جریان	شرایط نمونه	
				(K)	(A)		
1	-1	-1	1	473	70	1	142/36
2	1	-1	1	573	70	1	94/89
3	-1	1	1	473	110	1	125/70
4	1	1	1	573	110	1	107/14
5	-1	0	1	473	90	1	140/30
6	1	0	1	573	90	1	110/40
7	0	-1	1	523	70	1	142/49
8	0	1	1	523	110	1	131/60
9	0	0	1	523	90	1	150/70
10	0	0	1	523	90	1	142/70
11	0	0	1	523	90	1	139/10
12	0	0	1	523	90	1	152/40
13	0	0	1	523	90	1	144/60
14	-1	-1	2	473	70	2	108/29
15	1	-1	2	573	70	2	123/00
16	-1	1	2	473	110	2	160/90
17	1	1	2	573	110	2	173/70
18	-1	0	2	473	90	2	150/30
19	1	0	2	573	90	2	165/60
20	0	-1	2	523	70	2	136/50
21	0	1	2	523	110	2	181/40
22	0	0	2	523	90	2	172/70
23	0	0	2	523	90	2	169/40
24	0	0	2	523	90	2	174/80
25	0	0	2	523	90	2	181/20
26	0	0	2	523	90	2	178/90

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 سستام ایران با ظرفیت کشش 2 تن، در شرایط دمای محیط و با سرعت 2 mm/min انجام پذیرفت.



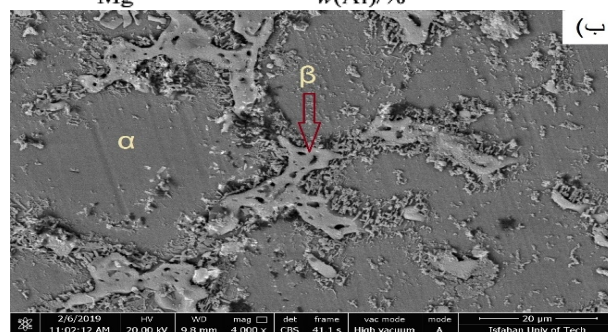
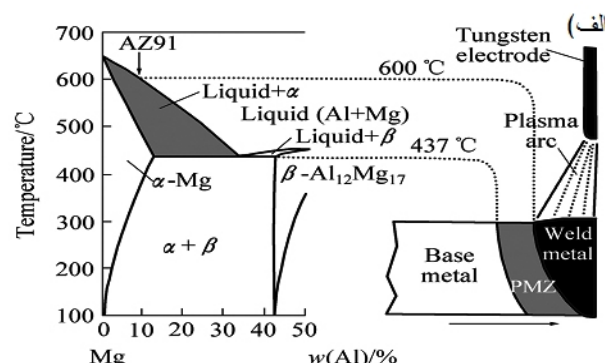
شکل 2- ابعاد و شکل نمونه آزمایش کشش (اندازه‌ها برحسب میلی‌متر).

و رادیوگرافی ری نمونه‌ها انجام پذیرفت. همچنین جهت بررسی ریزساختار منطقه شکست نمونه‌ها آماده متالوگرافی شدند. برای اچ کردن از محلول اتیلن گلیکول با ترکیب شیمیایی 20ml acetic acid+60ml Ethylene glycol+1ml HNO₃+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.

3- نتایج و بحث

3-1- ریز ساختار آلیاژ ریختگی منیزیم AZ91C

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



شکل 3- الف- نمودار فازی آلیاژ AZ91 و نمایش 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 (یوتکتیک) در محلول جامد α -Mg و همچنین رسوبات ناپیوسته لایه ای، در ساختار مشاهده می شود. فاز یوتکتیک نامنظم (β یوتکتیک) به دو صورت، کاملاً و جزئی تفکیک شده می باشد. در یوتکتیک کاملاً جدا شده دو فاز یوتکتیک به صورت کاملاً مجزا در حین انجماد تشکیل می شوند. 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؛ دانه های اولیه α -Mg،

فاز یوتکتیک (یوتکتیک α -Mg و β) و در نهایت رسوبات لایه ای β می باشد.

انجماد آلیاژ AZ91C با جوانه زنی منیزیم اولیه (α -Mg) شروع می شود. با رشد فاز α -Mg به صورت دندریتی عناصر محلول Zn و Al به داخل مذاب بین دندریت پس زده می شوند 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 - $Mg_{17}Al_{12}$ می باشد، در دمای 437 درجه سانتی گراد انجام می شود و پس از پایان انجماد فاز α غنی از Al بصورت رسوب گذاری ناپیوسته تبدیل به ساختار لایه ای $\beta + \alpha$ می گردد که این مطلب به طور عمومی به انجماد یوتکتیک جدا شده معروف می باشد [14].

3-2- ریزساختار ناحیه جوش

شکل (4-الف)، تصاویر میکروسکوپ نوری منطقه جوشکاری ذوبی آلیاژ ریختگی AZ91C را نشان می دهد. در ناحیه جوش، ذوب کامل اتفاق می افتد و مذاب ایجاد شده با سرعت بالایی منجمد می شود و با توجه به بالا بودن نرخ سرمایش، ساختار جوش نسبت به آلیاژ پایه ریزتر بوده و مرزدهانه ها در ناحیه جوش دارای ساختاری غیرهمگن تر، شامل فازهای ثانویه ریز و پراکنده β - $Mg_{17}Al_{12}$ و همچنین تیغه های خشن یوتکتیکی می باشند. دمای واکنش یوتکتیک آلیاژ AZ91C در حدود 437 درجه سانتی گراد است. در زیر منطقه ذوب شده، دما پایین تر از دمای ذوب کامل آلیاژ یعنی زیر دمای 595 درجه سانتی گراد است و به همین دلیل ذوب کامل رخ نداده ولی از آنجایی که افزایش دما به سرعت رخ می دهد و ساختار یوتکتیکی نیز در ریز ساختار حضور دارد، در مناطقی از ساختار که دمایی بالاتر از 437 درجه سانتی گراد را تجربه می کنند انتظار می رود واکنش ذوب شدن یوتکتیکی رخ دهد و در ساختار شواهدی مبنی بر ذوب جزئی مشاهده گردد.

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

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:

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

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:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + \quad (3)$$

$$b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (4)$$

$$UTS = 160.58 - 4.45A + 11.06B + 13.54C + 3.41AB + 11.58AC + 13.65BC - 18.74A^2 - 12.4B^2$$

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

شرایط نمونه‌ها: 1

$$UTS = -2436.24 + 7.21A + 3.67B + 0.03AB - 0.007A^2 - 0.031B^2 \quad (5)$$

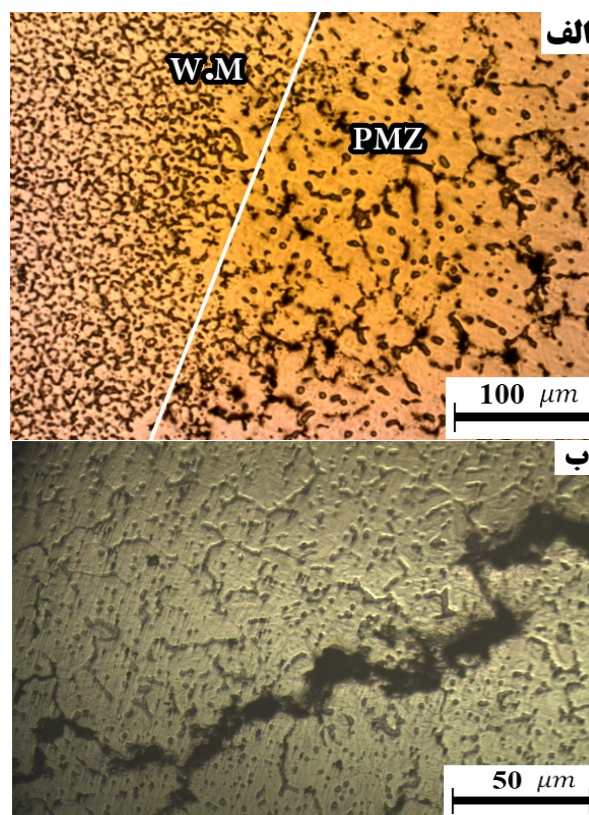
شرایط نمونه‌ها: 2

$$UTS = -2272.7 + 7.68A + 5.03B + 0.03AB - 0.007A^2 - 0.031B^2 \quad (6)$$

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.

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 منطقه PMZ شود [15].

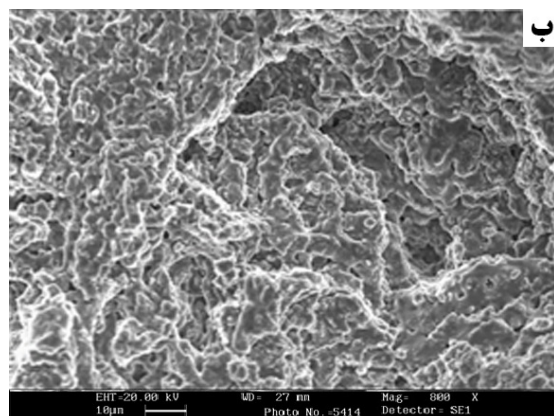
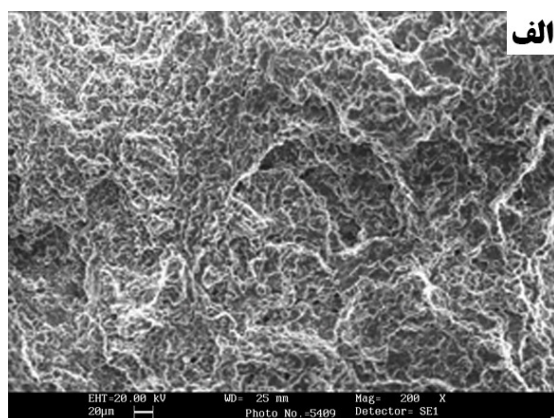


شکل 4- ریزساختار نوری نمونه 1 جوشکاری شده با جریان 140 آمپر، الف- فلز جوش و ب- ترک ذوبی در منطقه PMZ

با عبور منبع حرارتی، مذاب یوتکتیک تشکیل شده از مناطق ذوب شده با گسترش در مرزخانه‌ها 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.

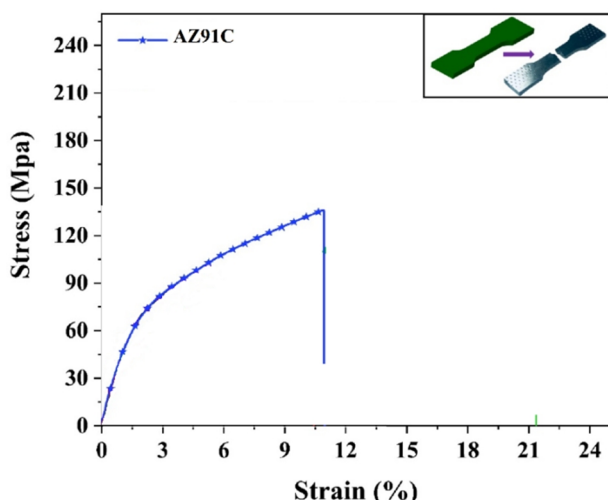
جدول 4- آنالیز واریانس (ANOVA)

منابع تغییرات	مجموع مجنورات	درجه آزادی	میانگین مجنورات	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			
Std. Dev	C.V. %	۱۴۶/۲	Mean	۵/۲۶	
Predicted R ²	Adjusted R ²	۰/۹۵		۰/۹۷	R ²
	PRESS	۱۴۸۹/۳۵		۲۸/۲۴	Adeq precision



شکل 5- تصاویر SEM از مورفولوژی سطح شکست ترک گرم آلیاژ AZ91C (نمونه 1 جوشکاری شده با جریان 140 آمپر) در دو بزرگنمایی مختلف.

به عبارت دیگر احتمال اینکه مدل به صورت تصادفی به دست آمده باشد کمتر از 0/01% می باشد. توزیع نرمال داده ها در نمودار NPP در شکل (6-الف) قابل مشاهده است که صحت نتایج حاصل از آنالیز واریانس را تایید می کند. 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 می کند. به عبارت دیگر 97% از اعداد پیش بینی 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 می یابد. بزرگ بودن R² تاییدکننده تطابق رضایت بخش داده های آزمایش بر مدل مرتبه دوم است. در این تحقیق، R² بزرگتر از 0/97 و ضریب Adj R² بالاتر از 0/95 می باشد، بنابراین مدل مرتبه دوم بر داده ها برازش خوبی داشته است. نمودار مقادیر پیش بینی شده برحسب مقادیر واقعی (شکل 6-ب) نیز تطابق مقادیر پیش بینی شده را با مقادیر اندازه گیری شده تایید می کند. در نهایت نسبت سیگنال به نویز (دقت کافی) به عنوان آخرین نتیجه استخراج شده از آنالیز واریانس مورد بررسی قرار گرفت.



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

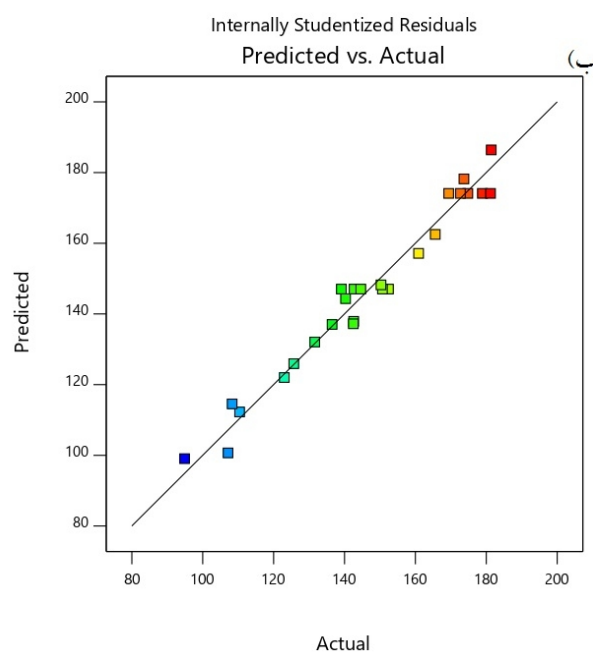
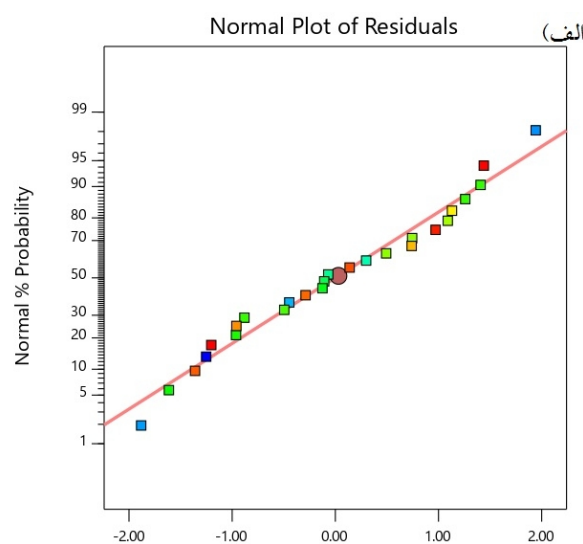
3-5- تاثیر پارامترهای جوشکاری تعمیری TIG بر مقدار استحکام کششی نهایی (UTS)

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 می توان 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 می گیرد. در نمودارهای سطح پاسخ، دو پارامتر در محورهای X و Y و پاسخ در محور Z به تصویر کشیده شده است که در نهایت نقطه مطلوب را نشان می دهد.

مقدار 28/24 برای نسبت سیگنال به نویز نیز کفایت مدل را تایید می کند (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 اندازه گیری گردید. با مراجعه به رابطه 5 مقدار استحکام استحکام کششی نهایی پیش بینی شده، برابر 142/5 MPa می باشد که مطابقت نسبتاً خوبی را با داده های جدول (3) نشان می دهد.

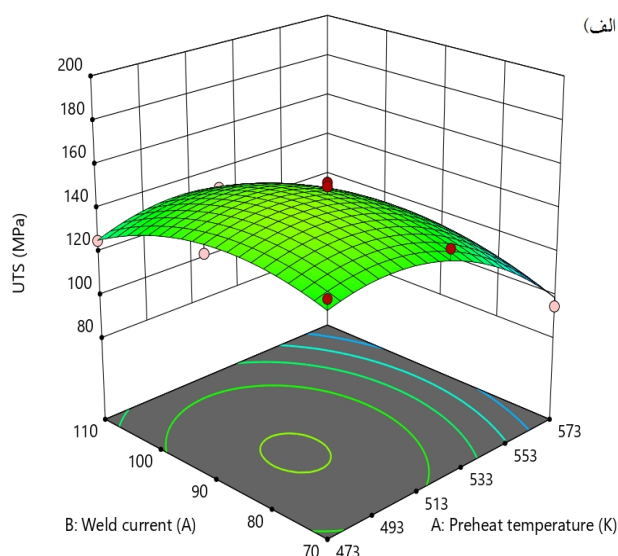


شکل 6- بررسی پیش فرض های مدل، الف- نمودار احتمال نرمال، ب- نمودار مقادیر پیش بینی شده برحسب مقادیر واقعی استحکام کششی.

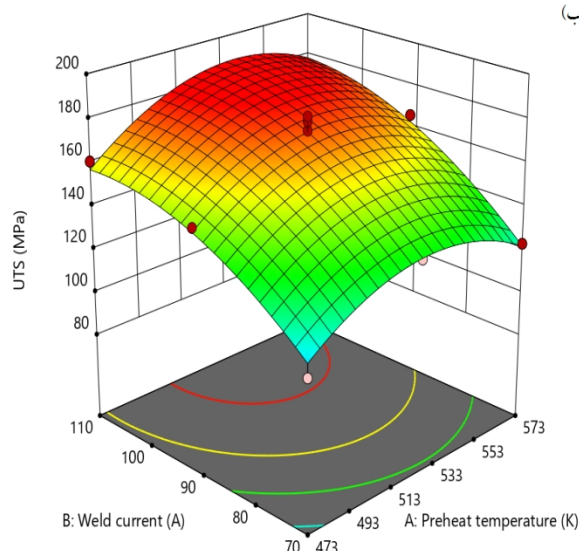
جدول 5- برآورد ضرایب فاکتورهای آزمایش

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

(الف)



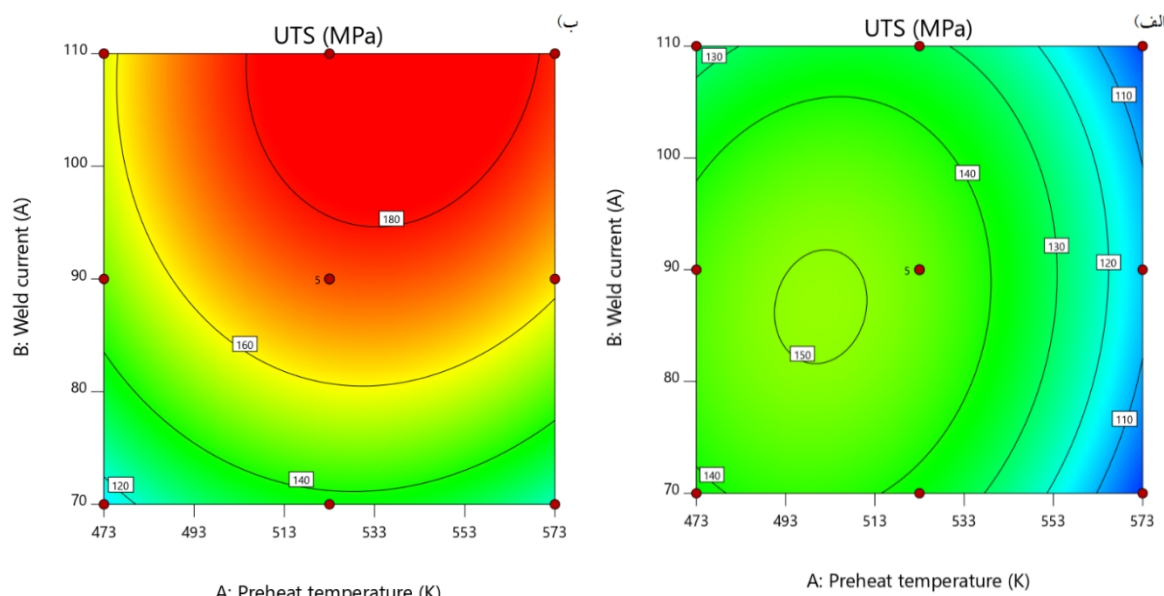
(ب)



شکل 8- نمودار سطح پاسخ برای استحکام کششی؛ الف- شرایط نمونه 1؛
ب- شرایط نمونه 2.

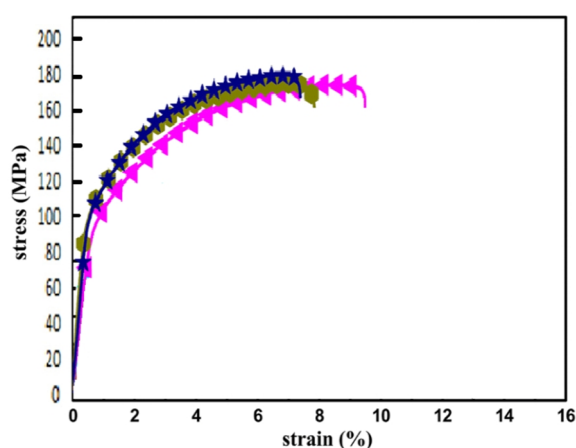
شکل (8)، نمودار سطح پاسخ را نشان می‌دهد. شکل (8-الف) نمودار سطح پاسخ سه بعدی از مدل رگرسیونی حاصل شده را در شرایط نمونه 1 نشان می‌دهد. نقاط قرمز، نقاطی هستند که مقادیر واقعی از مقادیر پیش‌بینی شده بیشتر هستند. نقاطی، نقاطی را نشان می‌دهند که مقادیر واقعی کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده هستند. بالاترین استحکام کششی در قله نمودار مشاهده می‌گردد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار استحکام کششی در دمای پیشگرم 493 تا 513 درجه کلین 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 کلین 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 نشان می‌دهد. با افزایش دمای پیشگرم تا 513 درجه کلین، میزان استحکام کششی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای پیشگرم از 513 تا 573 درجه کلین، میزان استحکام کششی به تدریج کاهش می‌یابد. نتایج برای شدت جریان نیز نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان تا 90 آمپر، استحکام کششی افزایش و پس از آن با افزایش شدت جریان تا



شکل 9- نمودارهای تراز برای استحکام نهایی کششی الف- شرایط نمونه 1؛ ب- شرایط نمونه 2.

شرایط نمونه 2 در نظر گرفته شود، میزان استحکام کششی 157/1 مگاپاسکال به دست خواهد آمد. مطلوبیت این فرمول، ارزیابی شده است. به این معنی که دستیابی به هدف با استفاده از فرمول مذکور 100% می باشد [12]. با توجه به پارامترهای بهینه شده برای نمونه های 2، خواص کششی نمونه جوشکاری شده با جریان 110 آمپر و دمای پیشگرم 523 درجه کلوین را مورد بررسی قرارداداده و مطابق نمودار تنش- کرنش (شکل 10) برای نمونه ای 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 110 A (3 مرتبه تکرار)

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

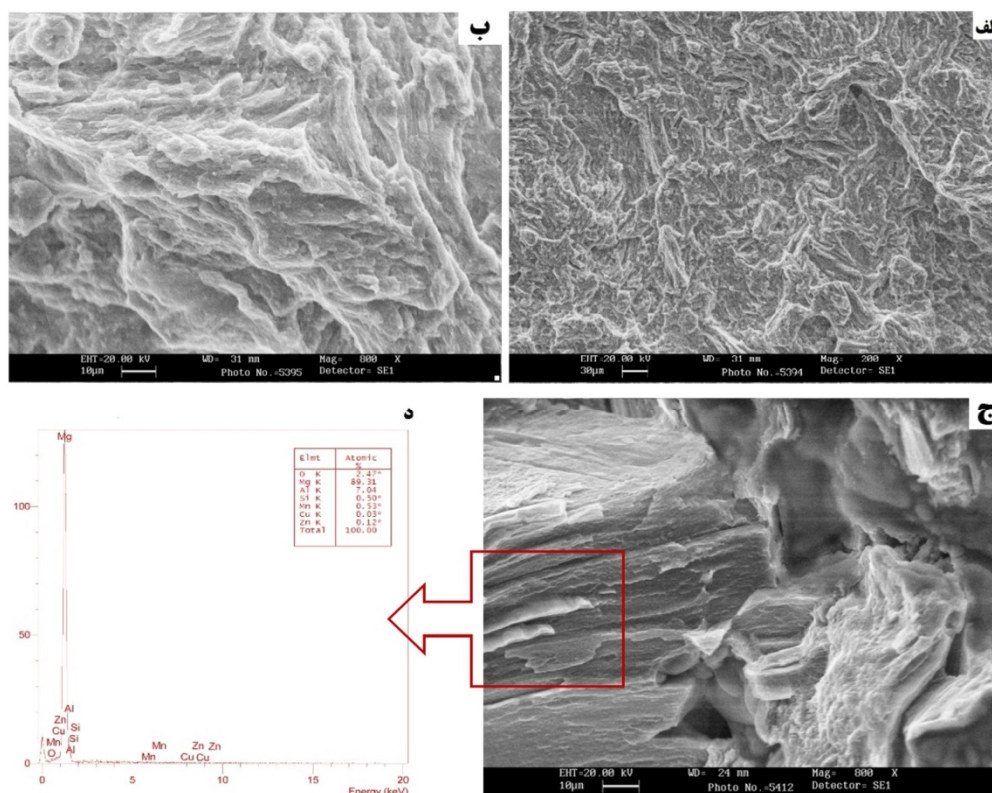
فرایند بهینه سازی سطوح سه متغیر دمای پیشگرم، شدت جریان ورودی و شرایط نمونه برای دستیابی به بیشترین استحکام کششی انجام شد. کمترین و بیشترین مقدار استحکام کششی به ترتیب 94/89 و 181/4 مگاپاسکال بدست آمد. جهت بهینه سازی متغیر وابسته، مقدار هدف برای استحکام کششی بیشینه در نظر گرفته شد. پارامترها و محدودیت های اعمال شده برای بهینه سازی در جدول (6) آورده شده است. علاوه بر این، 4 عدد از بهترین پاسخ های 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 نمونه های 1 و 2، نمونه های 2 دارای میانگین بالاتری از استحکام کششی بوده و لذا شرایط این نمونه ها از اهمیت بالاتری برخوردار می باشد. به این ترتیب، چنانچه دمای پیشگرم 527/79 درجه کلوین، شدت جریان ورودی 107/93 آمپر و

جدول 6- محدودیت های اعمال شده پارامترها برای بهینه سازی 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 پاسخ های ارائه شده برای مقادیر بهینه به منظور دستیابی به بیشترین استحکام کششی در نمونه های شماره 2

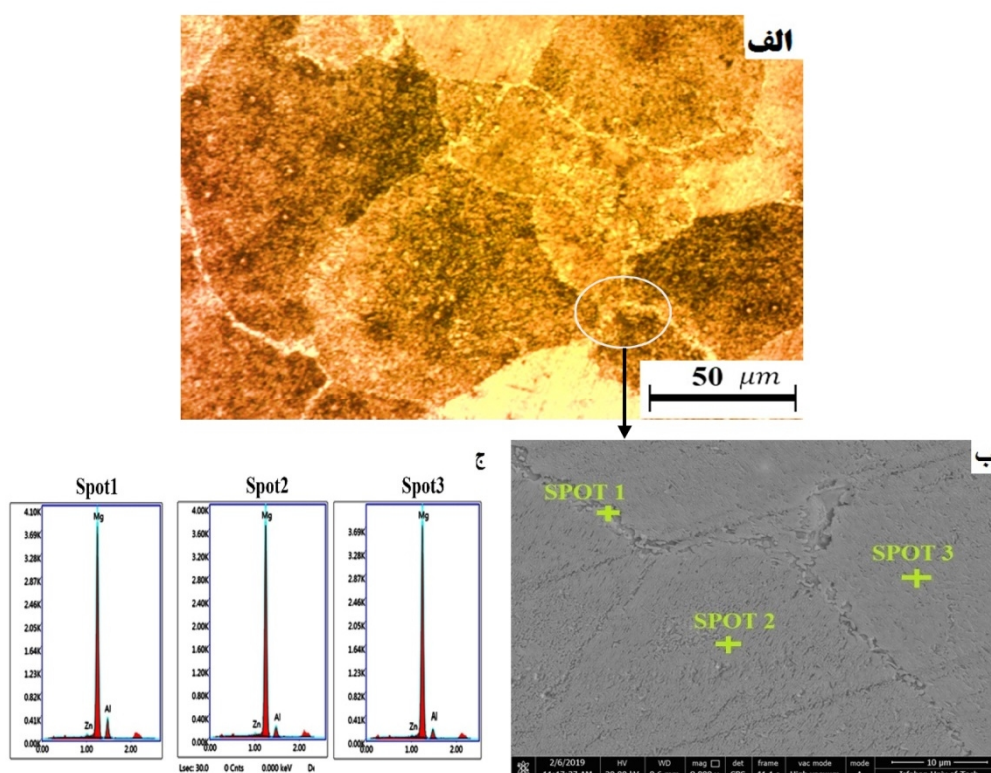
شماره	دمای پیشگرم (K)	شدت جریان ورودی (A)	استحکام کششی (MPa)	مطلوبیت
۱	۵۲۷/۷۹۱	۱۰۷/۹۳۰	۱۸۷/۱۰۴	۱
۲	۵۰۹/۲۵۰	۱۰۸/۰۰۰	۱۸۲/۰۸۶	۱
۳	۵۳۱/۶۶۶	۱۰۶/۷۸۸	۱۸۷/۲۸۷	۱
۴	۵۳۸/۰۰۰	۱۰۸/۰۰۰	۱۸۷/۶۸۱	۱



شکل 11- تصاویر SEM سطح شکست و نتایج آنالیز EDS برای نمونه 2، جوشکاری شده با جریان 110 آمپر و دمای پیشگرم 523 درجه کلوین.

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 -Mg₁₇Al₁₂ شکست از درون دانه رخ داده است. در واقع با انحلال فاز سخت β در مرز دانه ها، استحکام این مناطق نسبت به تنش های وارده افزایش یافته که با وجود افزایش استحکام ماده در داخل دانه ها توسط رسوب فازهای ثانویه،

با توجه به شکل (11)، با بررسی مورفولوژی سطح شکست و نتایج آنالیز EDS، ملاحظه می شود که شکست ترد تورقی از نوع درون دانه ای غالب بوده، هرچند در برخی از مناطق، شکست به صورت ترد بین دانه ای بوده است. تغییر شکل پلاستیک نیز در برخی از نواحی به صورت خطوط سیلان نمایان می باشد. مطابق شکل (12)، با بررسی ریزساختار میکروسکوپ



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

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 تا 553 درجه کلوین و شدت جریان‌های

گسست ماده از داخل دانه‌ها به صورت عمده رخ داده 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

- 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 resistance 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 New Morphologies 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 Metals III*, 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.

100 تا 110 آمپر 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 کلون 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. Immarrigeon, 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 butt welded AZ61 magnesium alloy plates", *Material Characterisation*, 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.