

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: <u>m.rafiei@pmt.iaun.ac.ir</u>



مجید اصلانی، مهدی رفیعی 🛑

مركز تحقيقات مواد پيشرفته، دانشكده مهندسي مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامي، نجف آباد، ايران.

دريافت مقاله: 1400/07/01؛ پذيرش مقاله: 1400/08/08

چکیدہ

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 مستحکم تر 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 T6 قرار گرفتند) دارای رسوبات پیوسته بوده که این رسوبات به دلیل قطع پایشتر صفحات لغزش و ایجاد موانع مستحکم تر در مسیر حرکت نابجایی ها، استحکام را تحت تاثیر خود قرار داده و در مقایسه با نمونههای 1 (نمونههایی که تنها بعد از جوشکاری تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفتند) دارای رسوبات پیوسته بوده که این رسوبات به دلیل قطع پایشتر صفحات لغزش و ایجاد موانع مستحکم تر در مسیر حرکت نابجایی ها، 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

> كلمات كليدى: جوشكارى تعميرى، AZ91C، TIG، استحكام كششى، طراحى أزمايش. مستول، پست الكترونيكى: <u>m.rafiei@pmt.iaun.ac.ir</u>

1- مق*د*مه

آلیاژهای منیزیم نسبت به دیگر آلیاژها و به خصوص آلیاژهای آلومینیوم تحت شرایط یکسان، دارای انعطاف پذیری 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 ریخته گری 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

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 روش های مختلف به خصوص روش اصطکاکی اغتشاشی، قوس پلاسما و قوسی با الکترود تنگستن (GTAW) بررسی هایی انجام شده است اما در مورد ترمیم عیوب قطعات ریخته گری 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 [5]. حضور آلیاژهای منیزیم، علاوه بر تشکیل انواع ترکیبات ناشی از حضور عنصر سوم، با توجه به نوع آلیاژ منیزیم باعث تشکیل منطقه آلیاژها پس از جوشکاری ترمیمی شده که ایجاد انواع ترکهای گرم را در ناحیه ترمیمی محتمل می کند[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].

این می می از می استفاده از جریان پالسی حین جوشکاری رز و همکاران با استفاده از جریان پالسی حین جوشکاری فوسی 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 می شود [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 هم محور 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-Mg₁₇Al₁₂ در ناحیه متاثر از حرارت جوش شده که باعث افزایش استحکام و انعطاف پذیری منطقه جوش می شود. 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 فاز2nAl₁₂K 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 براستحكام كششى نهايي و حصول بيشينه استحكام با پارامترهای بهینه شده با استفاده ازروش طراحی آزمایش CCF و به کارگیری روش RSM می باشد که در نهایت فرایند بهینه سازی سطوح متغيرها براي دستيابي به بيشترين استحكام كششي نهايي انجام و حد مطلوب و نقطه بهینه استحکام نهایی کششی در قطعات ترميم شده با بهينهسازي پارامترهاي جوشكاري تعميري TIG حاصل و مدل ریاضی جهت پیش بینی 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].

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.



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

-	-					~	
a 1 a 1 .	1. •.1	1	1. •	1	1 1 2	• •	t .
در اذهار شد .	12/11		متون هاه	(ad I an I	n. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1.	-/	1 0.13
	0.0					_	0,000
U							

سطوح			la in	ثابط نبينه
١	•	- 1	للتغيير فك	شرايط تموقه
۵۷۳	۵۲۳	472	دمای پیشگرم (کلوین)	۲.۱
11.	٩٠	٧.	شدت جریان ورودی (آمپر)	

فرایند جوشکاری توسط دستگاه ERAZ92A (که فلزپرکننده جریان متناوب همراه با فلز پرکننده ERAZ92A (که فلزپرکننده معمول در جوشکاری آلیاژ AZ91C است) با قطر mm 4 مطابق با استاندارد W28 صورت پذیرفت. جهت ایجاد قوس، از الکترود تنگستن به قطر mm 1/6 mm همراه با نازل سرامیکی به قطر 4mm و بهمنظور محافظت از حوضچه مذاب در حین جوشکاری، از دمش گاز آرگون با درجه خلوص 99/99 و با جریان 10 lit/min بررسی عیوب سطحی و داخلی، به ترتیب آزمون مایع ناف 2- مواد و روش تحقیق
 2- آماده سازی نمونه
 3-1- آماده سازی نمونه
 30 از جنس آلیاژ منیزیم AZ91C توسط دستگاه Sander
 30×80 mm³ به ابعاد 30×80 mm³ 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 mm 15 و با عمق mm 4 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

Al	Mn	Ni	Zn	Fe	Mg	عنصر آلياژي
۸/۴۴	•/14	<•/•۵	•/۵•	<•/•۵	باقيمانده	درصد وزنی

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.

استحكام		مقادير واقعى			مقادیر کد شدہ		
كششى	شرايط نمونه	شدت جريان	دمای پیشگرم	شرايط نمونه	شدت جريان	دمای پیشگرم	شماره آزمایش
(MPa)		(A)	(K)				
147/39	١	٧.	۴۷۳	١	- 1	-1	١
٩۴/٨٩	١	٧.	۵۷۳	١	- 1	١	۲
170/1.	١	11.	۴۷۳	١	١	-1	٣
1.V/14	١	11.	۵۷۳	١	١	١	۴
14./*.	١	٩٠	424	١		-1	۵
11./4.	١	٩٠	۵۷۳	١		١	۶
147/49	١	٧.	۵۲۳	,	-1	•	V
181/8.	١	11.	۵۲۳	١	١		٨
۱۵۰/۷۰	١	٩.	۵۲۳	١			٩
141/1.	١	۹.	۵۲۳	١			1.
189/1.	١	٩٠	۵۲۳	١			11
101/4.	1	٩٠	۵۲۳	١	•		17
144/8.	١	٩.	۵۲۳	١	•		١٣
۱. ٧/٢٩	۲	٧.	424	۲	- 1	-1	14
177/	۲	٧.	۵۷۳	۲	- 1	١	۱۵
18./9.	٢	11.	۴۷۳	۲	١	-1	18
177/1.	۲	11.	۵۷۳	٢	١	١	١٧
10./	۲	٩٠	424	۲		- 1	١٨
180/8.	۲	٩.	۵۷۳	۲		١	١٩
189/0.	۲	٧.	۵۲۳	٢	-1		۲.
۱۸۱/۴۰	۲	11.	۵۲۳	۲	١		۲۱
177/.	۲	٩.	۵۲۳	۲			77
189/4.	۲	٩٠	۵۲۳	٢			۲۳
174/4.	۲	٩٠	۵۲۳	٢			74
141/7.	۲	٩٠	۵۲۳	۲			۲۵
۱۷۸/۹۰	۲	٩.	۵۲۳	۲			79

جدول3- مقادیر کد شده و مقادیر واقعی پارامترهای آزمایش

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 سرعتmm/min یا ایجام پذیرفت.



و راديوگرافی ری نمونه ها انجام پذيرفت. همچنين جهت بررسی ريزساختار منطقه شکست نمونه ها آماده متالوگرافی شدند. برای اچ کردن از محلول اتيلن گلايکل با ترکيب 20ml acetic acid+60ml Ethylene glycol+1ml شيميايی HNO₃+20ml water فسيميات اچ جهت بررسی ريزساختاری منطقه شکست از میکروسکوپ نوری مدل Olympuse-BX60M ساخت کشور ژاپن استفاده گرديد. علاوه بر اين، برای بررسی توزيع عناصر آلياژی و سطوح شکست نمونه های آزمايش کشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO-440i ساخت کشور آلمان مجهز به طيف سنج توزيع انرژی اشعه ايکس (EDS)

3- نتایج و بحث AZ91C 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 (می ساختار می فاز β می اشد 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 Mg- α و همچنین رسوبات ناپیوسته لایهای، در ساختار مشاهده می شود. فاز یوتکتیک نامنظم (β یوتکتیک) به دو صورت، کاملاً و جزیی 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 می شوند. در این حالت هر منطقه بین دندریتی شامل فاز Mg₁₇Al₁₂ 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 می شود. با رشد فاز M- α -m به صورت دندریتی عناصر محلول AI و N به داخل مذاب بین دندریت پس زده می شوند و در اثر انجماد غیرتعادلی با رسیدن مقدار AI در مذاب بین دندریت به مقدار واکنش یوتکتیک، واکنش انجمادی یوتکتیک که شامل فازهای α غنی از آلومینیم و β -Mg₁₇Al می باشد، در دمای فازهای α غنی از آلومینیم و یو که می از پایان انجماد فاز α عنی از AI بصورت رسوبگذاری ناپیوسته تبدیل به ساختار لایه ی β + β می گردد که این مطلب به طور عمومی به انجماد یوتکتیک جدا شده معروف می باشد [14].

2-3- ريزساختار ناحيه جوش

شکل (4-الف)، تصاویر میکروسکوپ نوری منطقه جوشکاری ذوبی آلیاژ ریختگی AZ91C را نشان میدهد. در ناحیه جوش، ذوب كامل اتفاق مي افتد و مذاب ايجاد شده با سرعت بالايي منجمد می شود و با توجه به بالا بودن نرخ سرمایش، ساختار جوش نسبت به آلیاژ پایه ریزتر بوده و مرزدانهها در ناحیه جوش دارای ساختاری غیرهمگن تر، شامل فازهای ثانویه ریز و يراكندهβ-Mg₁₇Al₁₂و همچنين تيغه هاي خشن يو تكتيكي مي باشند. دمای واکنش یو تکتیک آلیاژ AZ91 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 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 جزيي 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

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 مرزدانه ها یا با تشکیل حوضچه های مذاب درون دانه ها، شرایطی شبیه ترک گرم به وجود می آورد که در شکل (4-ب)، که تحت شرایط با شدت جریان ورودی 140 آمپر جوشکاری شده است، مشخص می باشد و از آن به عنوان ترک ذوبی حاصل از ذوب ترکیبات زود ذوب در منطقه PMZ با حضور تنش های انقباضی جوشکاری، یاد می شود. سطح شکست ترک گرم در تصاویر میکرو سکوپ الکترونی روبشی شکل (5-الف) و (5-ب)، با دو بزرگنمایی متفاوت نشان داده شده است. مورفولوژی دندریتی که مشخصه ترک گرم می باشد 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) می باشد که می تواند به صورت زیر بیان گردد: UTS = f(A, B, C)(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 می گردد: (2) $Y = b_0 + \Sigma b_i x_i + \Sigma b_{ii} x_i^2 + \Sigma b_{ii} x_i x_i$ که با توجه به سه جمله متغیر (سه پارامتر متغیر) تعریف شده، چند جملهای در حالت مقادیر کد شده به صورت زیر بسط پیدا می کند: $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 +$ (3) $b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}{x_1}^2 + b_{22}{x_2}^2 + b_{33}{x_3}^2$ UTS= $1? \cdot / \Delta A_{-} / P \Delta A_{+} 1 / \cdot P B_{+} / P / \Delta P C_{+}$ (4)

r/r AB+11/2AAC+1r/r BC-1A/VrA'-

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

شرايط نمونهها:1

 $UTS = -\gamma \gamma A + \gamma \gamma \gamma \gamma B + \cdot / \cdot \cdot \gamma A B - \cdot / \cdot \cdot \gamma A^{\gamma} - \cdot / \cdot \gamma \gamma B^{\gamma}$ (5)

شرايط نمونهها: 2

 $UTS = -\tau \tau \vee \tau / v + v / \hat{\tau} \wedge A + \delta / \cdot \tau B + \cdot / \cdot \cdot \tau AB - \cdot / \cdot \cdot \vee A^{\tau} - \cdot / \cdot \tau \vee B^{\tau}$ (6)

4-3- 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 می گردد مقدار P مدل حاصل کمتر از 00001 بوده که نشان از اعتبار بالای مدل به دست آمده (بیشتر از 99/99 درصد) دارد.

مقدار P	مقدار F	ميانگين مجذورات	درجه آزادی	مجموع مجذورات	منابع تغييرات
< •/•••	88/98	1101/94	٨	14/10/01	مدل
•/••94	$\Lambda/\Delta\Lambda$	TTV/TV	١	TTV/TV	دمای پیشگرم (A)
< •/••••	55/.5	1488/11	١	1489/11	شدت جريان ورودي (B)
< •/•••1	177/77	4282/47	١	4292/47	شرايط نمونه (C)
·/· \¥۶	57.70	97/VQ	١	97/VQ	AB
< •/•••	۵٨/٢.	18.9/88	١	18.9/88	AC
< •/••••	٨•/٧٩	2224/01	١	2224/01	BC
< •/••••	V•/\V	194.100	١	194.10	A^2
< ./)	۳۰/۶۹	$\Lambda \Psi \Lambda / \Lambda \Lambda$	١	Λ Λ Λ	B^2
		YV/89	11	41.11	باقيمانده
•/ * ۶۵۷	۱/•V	TA/AV	٩	YOV/IV	فقدان برازش
		28/82	٨	۲۱۳/۰۰	خطای خالص
			۲۵	107/0/81	کل
Std. Dev	۵/۲۶	Mean	148/1	C.V. %	٣/۶
\mathbb{R}^2	•/9V	Adjusted R ²	•/٩۵	Predicte R ²	• /٩
Adeq precision	71/74	PRESS	1424/20		

جدول4- آناليز واريانس (ANOVA)





شکل5- 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 كمتر از %0/01 مي باشد. توزيع نرمال داده ها 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، كفايت مدل حاصل را تاييد مي كند. به عبارت ديگر 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 بودنR² تاییدکننده تطابق رضایت بخش دادههای آزمایش بر مدل مرتبه دوم است. در این تحقیق، R² بزرگتر از 0/97 و ضريب R² Adj بالاتر از 0/95 مى باشد، بنابراين مدل مرتبه دوم بر دادهها برازش خوبی داشته است. نمودار مقادیر پیشبینی شده برحسب مقادير واقعى (شكل6-ب) نيز تطابق مقادير پیش بینی شده را با مقادیر اندازه گیری شده تایید میکند. در نهایت نسبت سیگنال به نویز (دقت کافی) به عنوان آخرین نتیجه استخراج شده از آنالیز واریانس مورد بررسی قرار گرفت.

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 ۹۵۸، دمای پیشگرم ۲۵2K) 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 پیشبینی شده، برابرهMPa ا142/5 میباشد که مطابقت نسبتاً خوبی را با دادههای جدول(3) نشان



شکل6- بررسی پیش فرض های 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 A 90

5-3- 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 بر آورد 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.

6-3- 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 jwsti.iut.ac.ir on 2024-05-17

مجید اصلانی و مهدی رفیعی، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال هفتم، شماره2، پاییز و زمستان 1400، صفحه72-59 جدول5- برآورد ضرایب فاکتورهای آزمایش

ضريب تورم	ان ۹۵ ٪	حدود اطمين	خطای	ما آدام	5 N I	-<1.
واريانس	حد بالا	حد پائين	استاندارد	درجه ارادی	براورد صريب	فاكتور
	184/14	100/44	1/04	١	18.101	مدل
N	-1/24	-1/80	1/07	1	-4/40	دمای پیشگرم (A)
١	14/49	V/AD	1/07	1	11/.9	شدت جریان ورودی (B)
١	10/17	11/11	1/.*	1	14/04	شرايط نمونه (C)
١	V/TT	-+/0129	١/٨۶	١	٣/۴١	AB
N	14/14	$\Lambda/T\Lambda$	1/07	١	11/04	AC
N	18/10	1./44	1/04	1	14/80	BC
1/18	-14/.4	-24/20	۲/۲۴	١	-14/24	A^2
 1/14	-٧/۶٨	-11/17	4/44	Y	-17/4.	B^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 پیش بینی شده بیشتر هستند. نقاط صورتی، نقاطی را نشان میدهند که مقادیر واقعی کمتر از مقادیر پیش بینی شده هستند. بالاترین استحکام کششی در قله نمودار مشاهده می گردد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود، بیشترین مقدار استحکام کششی در دمای پیشگرم 493 تا 513 درجه کلوین و شدت جریان 80 تا 90 آمپر مشاهده می گردد. 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 می دهد. همانگونه که ملاحظه نمونه در شرایط نمونه 2 نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه دمای پیشگرم از 513 تا 553 درجه کلوین و شدت جریان ورودی از 100 تا 101 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 می دهد. با افزایش دمای پیشگرم تا 513 درجه کلوین، میزان استحکام کششی افزایش می یابد. همچنین با افزایش دمای پیشگرم از 513 تا 573 درجه کلوین، میزان استحکام کششی به تدریج کاهش می یابد. نتایج برای شدت جریان نیز نشان می دهد که با افزایش شدت جریان تا 90 آمپر، استحکام کششی اف زایش و پس از آن با اف زایش شدت جریان تا

UTS (MPa)





(۱۱ 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 کششی برای نمونههای 1و2 نمونههای 2 دارای میانگین بالاتری از استحکام کششی بوده و لذا شرایط این نمونهها از اهمیت بالاتری برخوردار می باشد. به این ترتیب، چنانچهدمای پیشگرم ور 20/79 آمپر و

شرایط نمونه لا 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 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)

ى	استجكام كشش	ما برای بهینهسازی	اعمال شده پارامتره)- محدودیت های	جدول
اهميت	وزن	حد بالا	حد پائين	هدف	پارامتر
٣	١	۵۷۳	۴۷۳	در محدوده	دمای پیشگرم(K)
٣	١	11.	٧.	در محدوده	شدت جريان ورودي(A)
٣	1	٢	١	در محدوده	شرايط نمونه
٣	١	1/1/4	٩۴/٨٩	ماكزيمم	استحکام کششی(MPa)

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

مطلوبيت	استحكام كششى	شدت جريان ورودي	دمای پیشگرم	شماره
	(MPa)	(A)	(K)	
١	1AV/1•۴	1.1/94.	07V/V91	١
١	187/+88	۱۰۸/۰۰۰	0.9/10.	۲
١	1AV/TAV	۱•۶/۷۸۸	031/888	٣
١	148/841	۱۰۸/۰۰۰	۵۳۸/۰۰۰	۴



شکل11- 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 مرزدانهها، استحکام این مناطق نسبت به تنشهای وارده افزایش یافته که با وجود افزایش استحکام ماده در داخل دانهها توسط رسوب فازهای ثانویه، 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



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 سرتاس دانه، ساختاری همگن ایجاد شده است. حضور رسوبات غالب

پیوسته در درون دانه ها عاملی جهت بهبود ساختار میباشد که احتمال ایجاد موانع لغزش نابجایی ها 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 تنش های بالا می باشد.

4- نتيجه گيرى

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 تا 553 درجه کلوین و شدت جریانهای 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.

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 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.