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

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

Volume 9, Number 2, 2024

Investigating the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of dissimilar welding of biodegradable magnesium alloy AZ31 to Ti-6Al-4V alloy by friction welding

A. Etemadi[1], M. Kasiri-Asgarani[1]*, H.R. Bakhsheshi-Rad[1], M. Sadeghi Gogheri[2]

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

2-Research & Development, Sirjan Jahan Steel Complex (SJSCO), Sirjan, Iran.

Received 6 May 2023 ; Accepted 22 June 2023

Abstract

In this research, dissimilar joining of biodegradable AZ31 alloy to Ti-6Al-4V titanium alloy by rotary friction welding method was investigated with aim of preparation of pin or screw for orthopedic applications. optical and scanning electron microscope (sem) were used to investigate the microstructure, x-ray diffraction was conducted for phase analysis, torsion and micro-hardness tests were carried out to investigate mechanical properties, and polarization and electrochemical impedance spectroscopy were employed to evaluate corrosion resistance. in the welding procedure, rotational speed of 1100, 1200 and 1300 rpm and friction time of 2 and 4 seconds were considered as variable parameters, and two parameters of friction pressure and forge pressure were considered as constant parameters at 50 and 40 MPa, respectively. The microstructure of the joint zone showed that there is no deformation in the titanium alloy side. However, in the magnesium side, the greatest amount of deformation occurred with the distance from the joint line, where weld center zone (CZ), dynamic recrystallization zone (DRX), thermomechanical affected zone (TMAZ) and partial deformation zone (PDZ) are detected. The formation of intermetallic phases such as Mg_2AlZn, Ti_3Al and also the refining the grains size is the main reason for increasing the hardness of the magnesium side near the joint line up to 150 HV. The results of the torsion test showed that the welded sample has the highest shear strength of 81.51 MPa and also the highest corrosion resistance among other samples at a rotation speed of 1200 rpm and a friction time of 4 seconds.

Keywords: AZ31 Magnesium Alloy, Ti6Al4V titanium Alloy, Friction Welding, Microstructure, Torsion Strength, Corrosion.

Corresponding Author: m.kasiri.a@gmail.com

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-07-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.03]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره2، پاییز و زمستان 1402

بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی، رفتار خوردگی اتصال غیرمشابه آلیاژ زیست تخریب پذیر منیزیمAZ31 به آلیاژ Ti-6Al-4V به روش جوشکاری اصطکاکی

آریا اعتمادی[1]، مسعود کثیری عسگرانی[1*]، حمیدرضا بخششی راد[1]، مجتبی صادقی گوغری[2]

1-مرکزتحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

2-تحقیق و توسعه، مجتمع جهان فولاد سیرجان، سیرجان، ایران.

دریافت مقاله: 1402/02/16 ؛ پذیرش مقاله: 1402/04/01

چکیده

در این تحقیق اتصال غیرمشابه آلیاژ زیست تخریب پذیر AZ31 به آلیاژ تیتانیومی Ti-6Al-4V به روش جوشکاری اصطکاکی چرخشی و با هدف نهایی ساخت پین یا پیچ دو جنسی ارتوپدی مورد بررسی وارزیابی قرار گرفت. از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی ریزساختار، از پراش پرتو ایکس برای آنالیز فازی و از دستگاه آزمون پیچش و دستگاه ریز سختی‌سنج برای بررسی خواص مکانیکی و از آزمایش پلاریزاسیون تافل و امپدانس الکتروشیمیایی برای بررسی مقاومت خوردگی استفاده شد. در عملیات جوشکاری، سرعت دورانی 1100، 1200 و 1300 دور بر دقیقه و زمان اصطکاک 2 و 4 ثانیه به عنوان پارامترهای متغیر، و دو پارامتر فشار اصطکاک و فشار فورج به ترتیب به میزان 50 و 40 مگاپاسکال به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شدند. بررسی ریزساختار منطقه اتصال نشان داد که در قسمت آلیاژ تیتانیوم تقریبا هیچ‌گونه تغییر شکلی وجود ندارد، اما در سمت منیزیم بیشترین میزان تغییر شکل و با فاصله گرفتن از خط اتصال به ترتیب، منطقه اتصال(CZ)، منطقه تغییر شکل جزیی (PDZ)، منطقه متاثر از عملیات ترمومکانیکی(TMAZ)ومنطقه تبلور مجدد دینامیکی (DRX) قابل مشاهده می‌باشند. تشکیل ترکیبات بین فلزی مانند Mg2AlZn، Ti3Al و همچنین ریز شدن دانه‌ها باعث افزایش سختی ناحیه منیزیم مجاور خط اتصال تا 150 ویکرز شد. نتایج آزمون پیچش نشان داد نمونه جوشکاری شده در شرایط سرعت دوران 1200 دور بر دقیقه و در زمان اصطکاک 4 ثانیه دارای بالاترین میزان استحکام برشی و به مقدار 81/5 مگاپاسگال و همچنین دارای بالاترین مقاومت به خوردگی در بین سایر نمونه‌ها می‌باشد.

کلمات کلیدی: آلیاژ منیزیمیAZ31، آلیاژ تیتانیومی Ti-6Al-4V، جوشکاری اصطکاکی، ریز ساختار، استحکام پیچشی، خوردگی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m.kasiri.a@gmail.com

1- مقدمه

آلیاژهای منیزیم به دلیل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی عالی مانند چگالی کم، صلابت بالا، نسبت مقاومت به وزن بالا و عایق صوتی، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف خودرو، صنعت هوا و فضا دارد [1، 2]. همچنین آلیاژهای منیزیم به عنوان مواد کاشتنی تخریب پذیر می‌توانند در بدن انسان و سایر جانداران مورد استفاده قرار گیرند [1]. در حال حاضرکاشتنی‌های زیست تخریب‌پذیری که منجر به واکنش‌های

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-07-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.03]

التهابی نشده و باعث تحریک رشد استخوان گردند، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. بنابراین نسل جدید کاشتنی‌های زیست تخریب‌پذیر بایستی علاوه بر این که باعث افزایش سرعت بهبودی بافت‌های آسیب دیده، می‌شوند، دارای نرخ خوردگی مناسب بوده به نحوی که بافت استخوانی جدید بتواند جایگزین آن شوند و نیز همزمان دارای خواص مکانیکی مناسب باشند. علاوه بر این انتظار می‌رود که کاشتنی از عفونت ایجاد شده توسط حمله باکتری‌ها محافظت کند. بنا به این خصوصیات آلیاژهای پایه آهن، روی و منیزیم به عنوان کاندیداهای اصلی مطرح هستند[4].

منیزیم و آلیاژهای آن خواص مکانیکی شبیه به استخوان‌های انسانی دارند. چگالی منیزیم نزدیک به استخوان، مدول الاستیسیته آن پایین (45-50 GPa) و نزدیک به استخوان طبیعی (10-30GPa)است، بنابراین باعث جلوگیری از پدیده محافظت تنشی نیز می‌شود. [8-9]. اما سایر خواص مکانیکی و خوردگی منیزیم خالص برای کاشتنی مناسب نمی‌باشد. آلیاژAZ31 با کمترین مقدار آلومینیم، در مقایسه با سایر آلیاژهای منیزیم، خواص مکانیکی خوب و مقاومت مناسب در برابر خوردگی را دارد که به عنوان یکی از مواد زیست‌تخریب پذیر مناسب منیزیمی می‌باشد [9-8]. آلیاژ تیتانیومی Ti-6Al-4V نیز یکی از کاشتنی‌های غیرتخریب‌پذیر مهم در مهندسی پزشکی است که دارای استحکام ومقاومت به خوردگی عالی می‌باشد [9].

برای اتصال آلیاژ منیزیم به تیتانیوم و به علت اختلاف در خواص فیزیکی نقطه ذوب (Ti: 1668 °C, Mg: 650 °C) و هدایت حرارتی تیتانیوم برابر W/mK (وات بر متر کلوین) 21/9 و هدایت حرارتی منیزیم برابر 156 W/mK (وات بر متر کلوین) آن‌ها، روش‌جوشکاری حالت جامد اصطکاکی اغتشاشی مناسب می‌باشد زیرا استفاده از روش‌های ذوبی باعث ایجاد معایب و اشکالاتی نظیر تخلخل، درشت شدن دانه‌ها، تغییر شکل شدید و تنش باقی‌مانده زیاد نیز در اتصالات جوشکاری ایجاد می‌شود [11]. اتصال اصطکاکی یک فرایند اتصال دهی حالت جامد است که با استفاده از گرمای حاصل از اصطکاک ناشی از حرکت یک جزء اتصال نسبت به جزء دیگر و در اثر نیروی اعمالی ایجاد می‌شود. جوشکاری اصطکاکی دارای مزایایی مثل حرارت ورودی کم، منطقه متاثر از حرارت باریک، تنش باقیمانده کم و اعوجاج کم می‌باشد [12]. جوشکاری اصطکاکی چرخشی قدیمی‌ترین و پراستفاده‌ترین روش است که در آن یکی از قطعات اتصال حول محور خود می‌چرخد در حالی‌که قطعه دیگر ثابت باقی می‌ماند. دو قطعه تحت فشار مشخص به داخل یکدیگر فرو می‌روند. فرایند جوشکاری اصطکاکی چرخشی به صورت ذاتی انعطاف پذیر، قوی و برای استفاده مواد متفاوت مناسب است.

استحکام اتصالات جوشکاری شده در این فرایند تحت تاثیر فشار اصطکاک، زمان اصطکاک، فشار فورج و سرعت چرخش می‌باشد [14-12]. لاکشمینارایانان وهمکاران اثر فشار اصطکاک 15 تا 60 مگاپاسگال را بر خواص مکانیکی و ریزساختار اتصالات اتصال تیتانیوم خالص به آلیاژ منیزیمی ZK60 در جوش اصطکاکی خطی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش فشار اصطکاک، استحکام کششی اتصالات جوشکاری افزایش می‌یابد. هنگامی که فشار اصطکاک به 60 مگاپاسکال رسید، حداکثر استحکام کششی 177 مگاپاسکال بدست آمد که حدود 58 درصد از استحکام فلزپایه آلیاژ منیزیم بود. شکستگی از محل خط اتصال انجام شد. ایجاد یک لایه نازک غنی از فلز روی و زیرکونیوم در سطح مشترک اتصال بر استحکام کششی اتصال تأثیر گذاشت [12].

لیرد و همکاران از یک دستگاه شبیه‌سازی فیزیکی، شامل دوربین با سرعت بالا، سیستم تصویربرداری حرارتی، و سنسورهای اندازه‌گیری کمیت‌های مکانیکی، برای بررسی تولید گرمای اصطکاک و رفتار انتشار اتم در طول فرایند جوشکاری اصطکاکی منیزیم به تیتانیم استفاده کردند. با استفاده ار نتایج می‌توان دریافت که پدیده نفوذ سریع در سیستم جوشکاری اصطکاکی Mg-Ti وجود دارد. به عبارتی ضریب نفوذ فعال شده در این شرایط حدود 105 ضریب نفوذ حرارتی است [15]. صادقی و همکاران اثر سرعت‌های چرخشی 1100، 1200 و 1300 دور بر دقیقه خواص مکانیکی، رفتار خوردگی و زیست سازگاری پیچ آلیاژ تیتانیوم-منیزیم خالص ارتوپدی تهیه شده با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-07-12]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.03]

روش جوشکاری اصطکاکی را مورد بررسی قرار دادند. در برای تجزیه و تحلیل متالوگرافی نشان داد که اتصال خوبی در اتصال آلیاژ Ti/Mg به دست آمد و در سمت آلیاژ منیزیم، نواحی مختلفی مانند ناحیه مرکز جوش، ناحیه تبلور مجدد دینامیکی، منطقه تحت تاثیر مکانیکی حرارتی و ناحیه نیمه تغییر شکل یافته مشاهده شد. بیشترین مقاومت کششی و برشی به ترتیب 173 و 103/2 مگاپاسکال در سرعت چرخشی 1300 حاصل شد بود. اتصال از محل خط اتصال و در مجاورت ناحیه بین فلزی حاوی فاز Ti_3Al شکست خورد [16]. در این تحقیق ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال آلیاژ منیزیم AZ31 به تیتانیومی Ti-6Al-4V به روش جوشکاری اصطکاکی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

2-مواد و روش‌ها

2-1-مواد اولیه

از میلگردهایی از جنس آلیاژ منیزیم AZ31 و آلیاژ تیتانیومی Ti-6Al-4V به عنوان قطعات اولیه برای اتصال‌دهی به یکدیگر استفاده شد. ترکیب شیمیایی این دو آلیاژ با استفاده از آنالیز کوانتومتری در جدول‌های(1 و 2)، همچنین خواص مکانیکی آن‌ها در جدول(3) نشان داده شده است.

2-2-فرایند جوشکاری

آلیاژ منیزیم AZ31 و آلیاژ تیتانیومی Ti-6Al-4V به شکل میله‌ای استوانه ای با قطر 20 میلی‌متر و طول 80 میلی‌متر تهیه شد. نمونه‌ها تحت شرایط پارامتری مختلف و به شش حالت (جدول 4) تحت عملیات جوشکاری قرار گرفتند. در این فرایند سرعت چرخشی 1100، 1200 و 1300 دور بر دقیقه و زمان اصطکاک 2 و 4 ثانیه به عنوان پارامترهای متغیر، و دو پارامتر فشار اصطکاک و فشار فورج به ترتیب به میزان 50 و 40 مگاپاسکال به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شدند. برای شروع عملیات جوشکاری ابتدا سطح مقطع میله با استفاده از کاغذ SiC (#800) سمباده‌زنی شد و قبل از جوشکاری با استون تمیز شد. جوشکاری اصطکاکی با استفاده دستگاه جوشکاری اصطکاکی پیوسته مدل BX-15 ساخت شرکت آذین صنعت انجام شد. شکل(1) نمونه‌های جوشکاری شده M1 تا M6 را نشان می‌دهد. میزان کاهش طول در فرایند جوشکاری به پارامترهای مختلف جوشکاری بستگی دارد.

2-3-بررسی میکروسکوپی ریز ساختار و آنالیز فازی

پس از جوشکاری، مطابق با استانداردASTM E407-2017، با برش عمودی بر خط اتصال نمونه‌هایی از سطح مقطع برای متالوگرافی و بررسی ریز ساختار بریده شدند [17]. سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری شده با کاغذهای کاربید سیلیسیم با شماره‌های 200تا2500 سمباده زنی شد و با استفاده از خمیر الماس به عنوان پولیش نهایی پرداخت و صیقلی شدند. سمت تیتانیوم اتصال در محلول1 میلی‌لیتر اسیدفلوئوریک+4 میلی‌لیتر اسید کلریدریک + 95 میلی‌لیتر آب و به مدت 4 ثانیه و سمت منیزیم اتصال در محلول 1 میلی‌لیتر اسید نیتریک + 20 میلی‌لیتر اسید استیک + 60 میلی‌لیتر متانول + 19 میلی‌لیتر آب و به مدت 1 دقیقه، حک شدند. میکروسکوپ نوری (مدل نیکون)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی پراکنده انرژی (EDS، مدل FEE Quanta 200) برای مشاهده ناحیه جوش استفاده شد. آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) با دستگاه با مدل PHILIPS PW3040 با استفاده از تارگت Cu با طول موج برابر 0/154186 نانومتر تحت زاویه θ2 بین °90-10 با اندازه گام 0/02 درجه و زمان بر گام 1 ثانیه انجام گرفت.

2-4-آزمون خواص مکانیکی

از آنجایی‌که هدف نهایی این تحقیق تهیه پیچ‌های دوجنسی و برای کاربردهای ارتوپدی می‌باشد، و در طراحی این نوع پیچ‌ها مقاومت پیچشی از اهمیت بسیاری برخوردار است.

از این‌رو نمونه‌های جوشکاری شده بر اساس استاندارد ASTM E143 – 2017 تحت آزمون پیچش قرار گرفتند[18]. آزمون پیچش توسط دستگاه BST 200 (شرکت بارمتر) انجام شد. شکل(1) نمونه آماده سازی شده برای آزمون پیچش را نشان می‌دهد. جهت بررسی تغییرات ریزسختی، ابتدا از مرکز نمونه توسط وایر کات نمونه مسطح به ابعاد 1×2×2 سانتی‌متر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-07-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.03]

جدول1-ترکیب شیمیایی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V (برحسب درصد وزنی).

Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
پایه	۵٫۵	۳٫۵	≤۰٫۴۰	≤۰٫۲۰	≤۰٫۰۸	≤۰٫۰۵	≤۰٫۰۱۵

جدول2-ترکیب شیمیایی آلیاژ منیزیم AZ31 (برحسب درصد وزنی).

Mg	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ca	Fe	Ni
پایه	۲٫۵۰	۰٫۶۰	۰٫۲۰	۰٫۱۰	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۵

جدول3-خواص مکانیکی آلیاژهای AZ31 و Ti-6Al-4V (برحسب درصد وزنی).

آلیاژ	سختی(VHN)	ازدیاد طول(%)	استحکام تسلیم(Mpa)	استحکام کششی(Mpa)
AZ31	۷۰	۱۵	۱۵۲	۲۴۳
Ti-6Al-4V	۳۳٤	۳٦	۹۲۰	۸۸۰

تهیه و سپس آزمون سختی سنجی طبق استاندارد ASTM E 384-2017 [19] و توسط دستگاه ریز سختی سنجی مدل Koopa MH1 انجام شد. بار مورد استفاده در این آزمایش100گرم– نیرو و مدت زمان اعمال نیرو 10 ثانیه و در جهت افقی انجام شد.

2-5-بررسی رفتار خوردگی

آزمون خوردگی پلاریزاسیون تافل و امپدانس الکتروشیمیایی بر نمونه‌های جوشکاری شده و طبق استاندارد ASTM G59-2017 در دمای 37 درجه سانتیگراد و در یک ظرف شیشه‌ای حاوی 250 میلی‌لیتر محلول SBF با pH برابر 7/4 و در دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات Bio Logical SP300 انجام شد [20]. الکترود مرجع کالومل اشباع (SCE) والکترود شمارنده از جنس پلاتین مورد استفاده قرار گرفت. نرخ روبش ثابت و با مقدار 2 میلی ولت بر ثانیه و با مقدار اولیه 250- میلی ولت زیر پتانسیل مدارباز بوده و اندازه سطح در معرض محلول در آزمون 1/7 سانتی‌متر مربع بوده است .

3-نتایج و بحث

3-1-نتایج ریزساختار

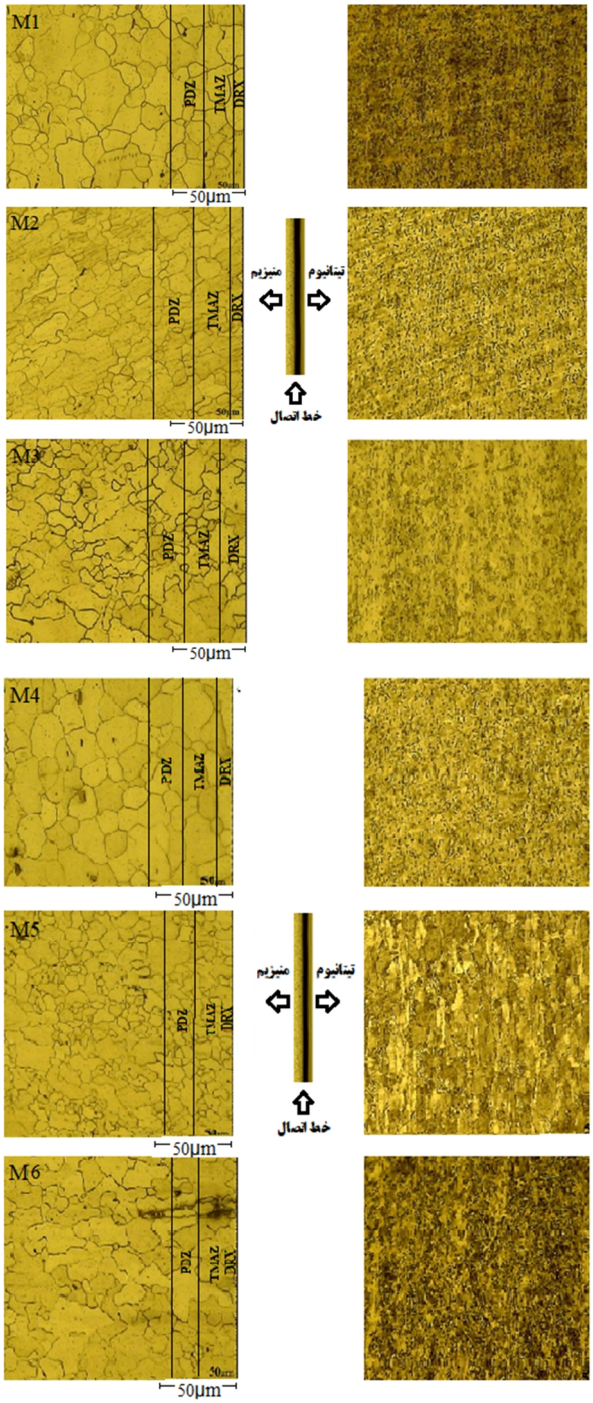
به علت پایین ترم بودن دمای فورج و تنس سیلان آلیاژ AZ31 نسبت به آلیاژ تیتانیومیTi-6Al-4V، فلاش در سمت آلیاژ منیزیمی ایجاد شده است (شکل1). به عبارت دیگر تغییر شکل پلاستیک زیاد در سمت منیـزم عمدتاً به دلیل استحکام تسـلیـم کمتر آلیاژ منیزیم در دماهای بالاتر است که البته میزان کاهش طول نمونه‌ها در حین جوشکاری و ناشی از تغییر فرم پلاستیکی، به پارامترهای جوشکاری بستگی دارد [12].

شکل1-نمونه‌های M1 تا M6 بعد از فرایند جوشکاری.

تغییر شکل پلاستیکی در جوشکاری اصطکاکی و در مقایسه با فرایند نورد معمولی پیچیده‌تر بوده و حاصل تعداد زیادی نوار برشی در جهات مختلف می‌باشد. نوارهای برشی و دوقلوهای مکانیکی به ریزشدن دانه‌ها در آلیاژ منیزیم AZ31 کمک می‌کند[21]. شکل (2) تصاویر متالوگرافی مناطق مختلف منطقه اتصال نمونه‌های M1 تا M6 در سه بخش سمت منیزیم، محل اتصال و سمت تیتانیوم را نشان می‌دهد. همانطوری‌که مشاهده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-07-12]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.03]

می‌شود به علت بالاتر بودن استحکام تسلیم آلیاژ تیتانیومی Ti-6Al-4V هیچگونه تغییر فرم پلاستیکی در این آلیاژ و در محل اتصال دیده نمی‌شود و ساختار متشکل از فازهای α و β می‌باشد در حالی‌که در سمت آلیاژ منیزیم، تغییر قابل توجهی در اندازه و شکل دانه‌ها دیده می‌شود واین میزان تغییر شکل با فاصله گرفتن از محل اتصال کاهش می‌یابد.



شکل2-تصاویر متالوگرافی نوری از سطح مقطع منطقه اتصال نمونه‌های M1 تا M6.

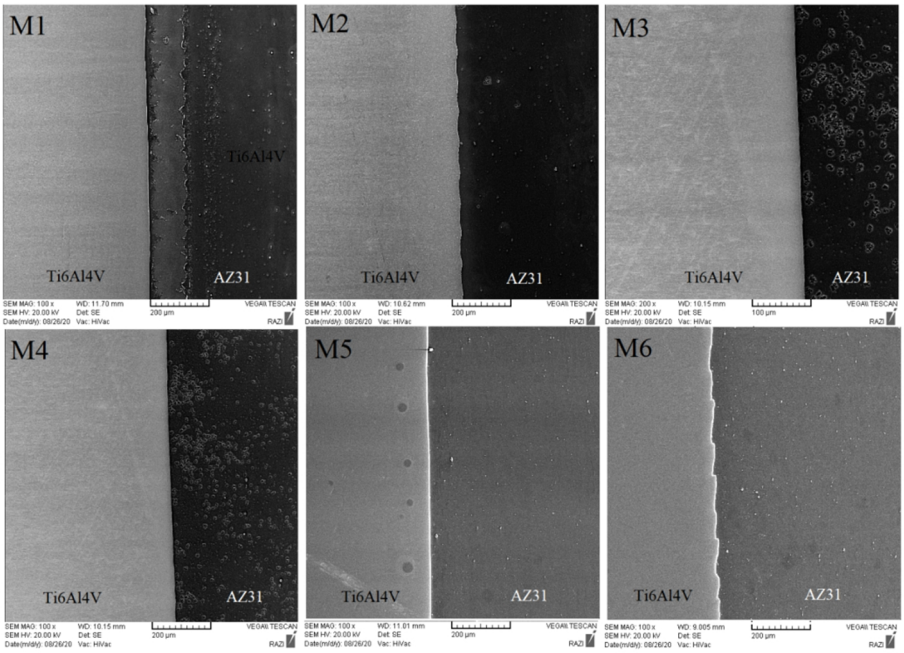
در سمت آلیاژ منیزیم، نواحی مختلفی مانند ناحیه تبلور مجدد دینامیکی، منطقه تحت تاثیر مکانیکی حرارتی ناحیه نیمه تغییر شکل یافته مشاهده می‌شود البته ناحیه مرکزی جوش کمتر از 15 میکرومتر بوده و بصورت یک لایه نازک سیاه در تصاویر تمام نمونه‌ها قابل مشاهده است [12،21،22]. شکل (3) نیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع منطقه اتصال نمونه‌های M1تا M6 را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز EDS خطی در مناطق مختلف نزدیک به فصل مشترک جوش‌ها و آنالیز نقشه EDS محل اتصال آلیاژ منیزیم AZ31 و آلیاژ تیتانیومTi-6Al-4V در شرایط مختلف جوشکاری را نشان می‌دهند (شکل 4). تصاویر SEM تشکیل پیوند کامل محل اتصال و عاری بودن از نقص در اتصال را نشان می دهد. در اینجا نیز لایه بسیار نازک محل اتصال بوسیله اختلاف کنتراست قابل مشاهده است که همانطوری‌که اشاره شد این لایه می‌تواند ناشی از ترکیبات بین فلزی احتمالی یا ریز شدن بسیار زیاد دانه‌ها باشد. نتایج آنالیز EDS خطی در مناطق مختلف نزدیک به فصل مشترک اتصالات و آنالیز نقشه EDS به وضوح وجود یک لایه مخلوط در فصل مشترک ترکیب بین آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V و آلیاژ منیزیم AZ31 را نشان نمی‌دهد.

اسکن خطی EDS نیز نشان می‌دهد که یک لایه نازک در سطح مشترک جوش رشد کرده است (شکل 5). توزیع عناصر در محل اتصال و به سمت آلیاژ منیزیم می‌تواند ناشی از وجود یک ترکیب بین فلزی باشد. در مقابل، در سمت تیتانیوم فقط تیتانیوم شناسایی شد، که تأیید می‌کند هیچ نفوذی از عناصر آلیاژ منیزیم به سمت تیتانیوم نشده و ترکیبات بین فلزی در طرف تیتانیوم ظاهر نمی‌شوند. آنالیز نقشه EDS همچنین توزیع عناصر مختلف در فلزات پایه و محل اتصال را نشان می‌دهد. وجود یک لایه بسیار نازک در محل و توزیع نامشخص و بهم ریخته در محل اتصال نیز می‌تواند نشان دهنده وجود یک ترکیب بین فلزی باشد.

3-2-آنالیز فازی پراش پرتو ایکس

شکست تمام نمونه‌های M1 تا M6 در آزمون پیچش از محل خط اتصال اتفاق افتاد. خط اتصال دارای ضخامتی حدود 10 میکـرومتـر است که ترکیبات بین فلزی بخش قابل توجهـی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-07-12]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.03]



شکل3- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح مقطع منطقه اتصال نمونه‌های M1 تا M6.

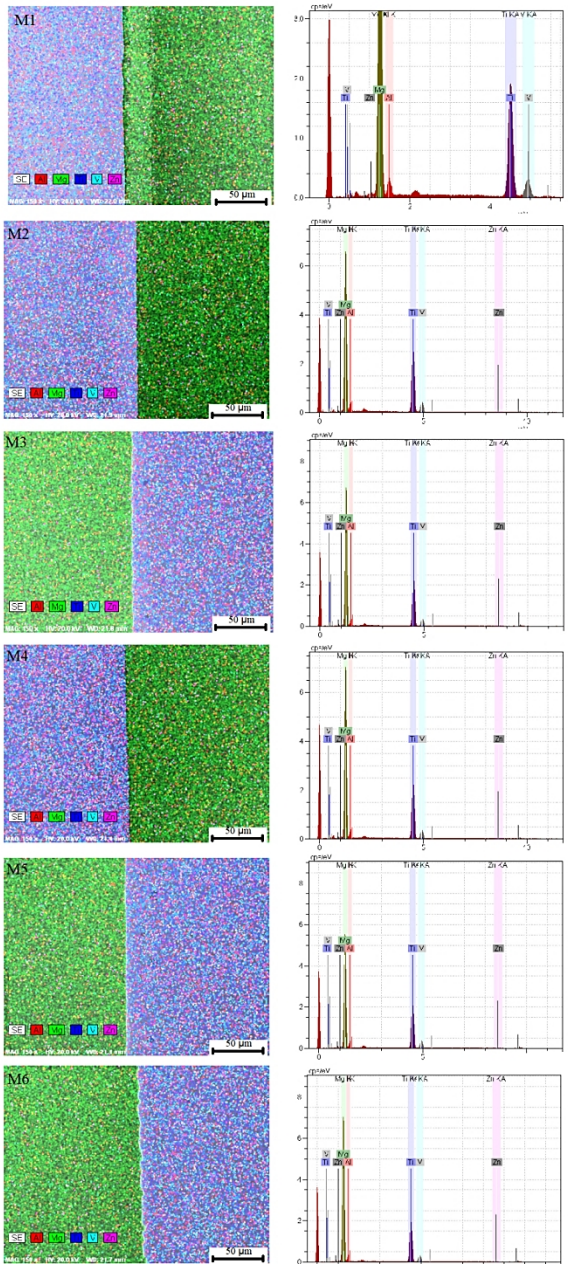
از آن را شامل می‌شود. آنالیز پراش پرتو اشعه ایکس سطح شکست سمت آلیاژ منیزیمی AZ31 نمونه M4 که دارای بیشترین استحکام پیچشی بوده، در شکل (6) نشان داده شده است. بررسی آنالیز پراش پرتو ایکس این سطح علاوه بر فاز محلول آلیاژی منیزیم آلفا زمینه، حضور فاز Mg2AlZn و ذرات ریز تیتانیومی که در اثر اصطکاک فرایند جوشکاری از سطح آلیاژ کنده شده است را، نشان می‌دهد. برای بهبود بخشیدن به اتصالات جوشکاری غیرمشابه، نفوذ عناصر مختلف در دمای بالا یک پارامتر مهم می‌باشد. ار این رو، استحکام این اتصالات با بالا رفتن حلالیت عناصر در فلزپایه افزایش پیدا می‌کند. با توجه به دیاگرام تعادلی Mg-Ti [23]، با در نظر گرفتن این نکته که حلالیت تیتانیوم در منیزیم حدود 0/12 و حلالیت منیزیم در تیتانیوم صفر می‌باشد، هیچگونه محلول جامدی یا ترکیب بین فلزی از این دو عنصر اصلی شکل نمی‌گیرد. هم‌چنین در اتصال این دو آلیاژ، تیتانیوم می‌تواند با آلومینیوم باقی‌مانده در منیزیم واکنش دهد و ترکیباتی مانند Ti_3Al، TiAl و $TiAl_3$ را بوجود بیاورد [23،24].

3-3-نتایج آزمون پیچش

همانطوری‌که گفته شد محل شکست تمام نمونه‌های M1 تا M6 در آزمون پیچش از ناحیه خط اتصال و حاوی ترکیبات بین فلزی و به سمت منیزیم صورت گرفت که نشان می‌دهد ضعیف‌ترین ناحیه از مناطق اتصال است. شکل (7) تصویر نمونه M4 پس از انجام آزمون پیچش را نشان می‌دهد. جدول (5) نتایج آزمون پیچش این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همانطوری‌که مشاهده می‌شود نمونه M4 در بین تمام نمونه‌ها از استحکام پیچشی یا مقاومت برشی بالاتری برخوردار است. افزایش سرعت چرخش در این نمونه نه تنها گرمای ورودی را افزایش می‌دهد، بلکه باعث تغییر شکل شدیدتر شده که در نهایت باعث کوچکتر شدن دانه‌ها می‌شود. همچنین بالا بودن استحکام کششی اتصال به ایجاد ترکیبات بین فلزی در منطقه جوش نیز وابسته است. تاثیر همزمان تغییر شکل شدید پلاستیکی و دمای بالا باعث می‌شود که عمق نفوذ عناصر آلیاژی از سطح مشترک به فلزات پایه افزایش یابد. تغییر شکل پلاستیکی و افزایش دما باعث ایجاد فضای خالی زیادی می‌شود که می‌تواند به طور قابل توجهی باعث نفوذ اتم در حین فرایند جوشکاری اصطکاکی شود. لی و همکاران گزارش کردند که ضریب نفوذ ناشی از تغییر شکل زیاد، حدود 105 برابر بیشتر از ضریب نفوذ حرارتی است. آن‌ها همچنین نشان دادند که ناحیه نفوذ در محل تماس Mg-Ti می‌تواند با افزایش سرعت چرخش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-07-12]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.03]

افزایش یابد. لازم به ذکر است که ضریب نفوذ علاوه بر دما به ساختار بلوری و عیوب کریستالی هم همبستگی دارد. از این رو نفوذ اتم در طول فرایند جوشکاری اصطکاکی نه تنها توسط دما بلکه با تغییر شکل شدید نیز افزایش می‌یابد[25،26].



شکل4-آنالیز نقشه EDS و نمودار فراوانی عناصر از سطح مقطع منطقه اتصال (سمن AZ31) نمونه‌های M1 تا M6.

3-4-نتایج آزمون میکروسختی

شکل(8) پروفیل نتایج ریزسختی سنجی مناطق مختلف اتصالات آلیاژ منیزیم AZ31 و آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به روش جوشکاری اصطکاکی مداوم نمونه‌های M1 تا M6 را نشان می‌دهد. تغییرات ریز ساختار در حین عملیات جوشکاری باعث اختلاف عددی و توزیع تغییرات میکروسختی شده است.

جدول4- شماره‌گذاری و پارامترهای متغیرجوشکاری نمونه‌ها.

شماره نمونه	سرعت چرخش(rpm)	زمان اصطکاک (s)
M1	۱۱۰۰	۲
M2	۱۱۰۰	۴
M3	۱۲۰۰	۲
M4	۱۲۰۰	۴
M5	۱۳۰۰	۲
M6	۱۳۰۰	۴

جدول5- استحکام پیچشی نمونه‌های M1 تا M6.

نمونه	M1	M2	M3	M4	M5	M6
استحکام پیچشی (MPa)	61,2	71,3	73,2	81,5	76,4	78,4

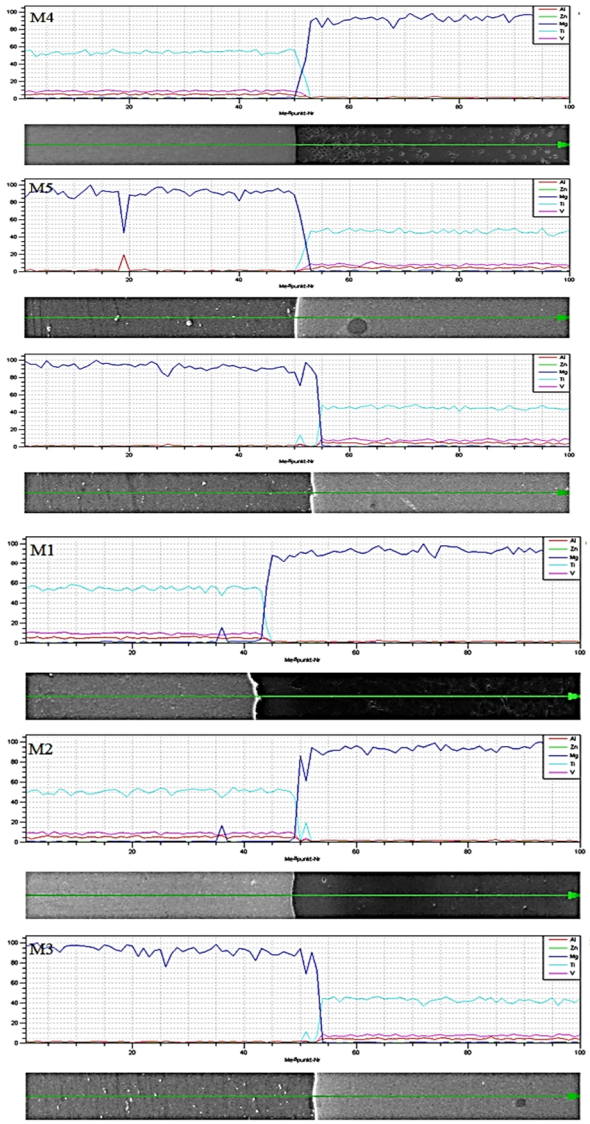
با حرکت کردن از سمت تیتانیوم به سمت منیزیم، اختلاف زیاد مقادیر سختی قابل مشاهده و هم‌چنین در محل اتصال، سختی همه نمونه‌های مورد آزمایش بین 117 تا 150 ویکرز می‌باشد. در سمت منیزیم، مقادیر سختی با نزدیک شدن به خط جوش افزایش یافته است که بخاطر وجود ترکیبات بین فلزی Mg_2AlZn و Ti_3Al و وجود احتمالی قطعات ریز تیتانیوم در سمت منیزیم و هم‌چنین ریزشدن دانه‌ها می‌باشد. در سمت دیگر، به دلیل محدودیت عدم تشکیل ترکیبات با آلیاژ تیتانیوم و هم‌چنین تغییر شکل محدود آن، تغییرات مشهودی دیده نشد [25،26]. بطورکلی تفاوت چندایی در مقادیر سختی نمونه‌های M1 تا M6 و در سمت منیزیم دیده نشد اما با ارزیابی عمیق‌تر و آنالیز عددی داده‌ها، نمونه M1 با دارا بودن سختی 150 ویکرز در خط اتصال از سختی بالاتری نسبت به دیگر نمونه‌ها برخوردار است که عمدتا به دلیل ریزتر بودن ساختار دانه‌ها، وجود ترکیبات بین فلزی و وجود ذرات ریز تیتانیومی، شرایط بهینه در حین جوشکاری اصطکاکی این دو آلیاژ می‌باشد.

3-5-بررسی رفتار خوردگی

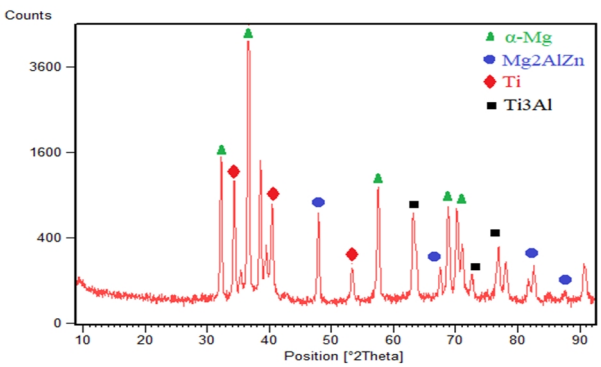
در شکل (9-الف) منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-07-12]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.03]

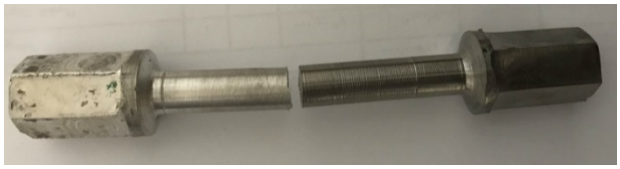
(9-ب) نایکوییست (Z' برحسب Z") حاصل از آزمونEIS ، (9-ج) منحنی باد -زاویه فاز مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده نمونه‌های M1 تا M6 آورده شده است.



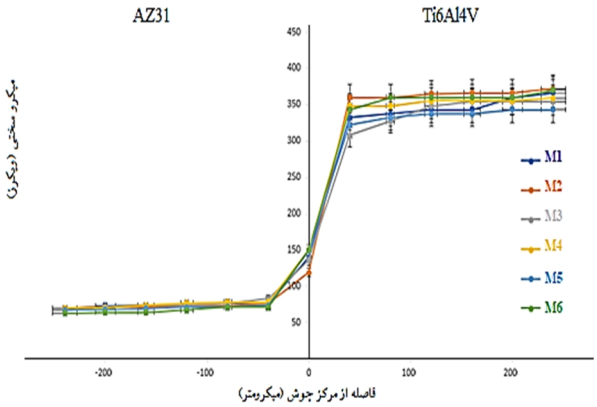
شکل5-آنالیز خطی EDS از سطح مقطع منطقه اتصال نمونه‌های M1 تا M6.



شکل6- پراش پرتو اشعه ایکس از سطح شکست سمت منیزیم نمونه M4.



شکل7-تصویر نمونه‌ی M4 پس از انجام آزمون پیچش.



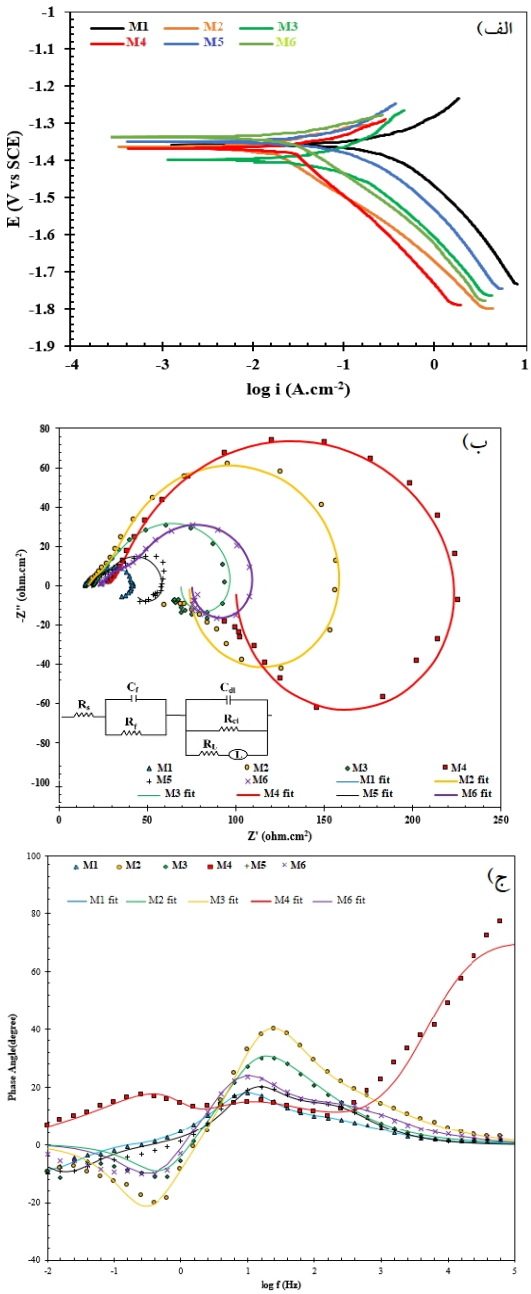
شکل 8- پروفیل نتایج ریز سختی سنجی.

در منحنی‌های پلاریزاسیون (9-الف) پتانسیل نمونه‌ها به آهستگی به سمت مقادیر مثبت‌تر حرکت و از این رو به عنوان آند عمل کرده و خورده می‌شود و یا پوشش اکسیدی تشکیل می‌دهد. دانسیته جریان با سینتیک خوردگی رابطه مستقیم دارد و به عبارت دیگر هرچه دانسیته جریان خوردگی بیشتر باشد یعنی سرعت خوردگی بیشتر است. از طرف دیگر پتانسیل یک پارامتر ترمودینامیکی است و هرچقدر پتانسیل خوردگی منفی‌تر باشد، بیانگر فعال‌تر بودن سیستم و بیشتر بودن تمایل ترمودینامیکی آن به خوردگی است. بنابراین هرچقدر منحنی‌های پلاریزاسیون به سمت چپ و بالا جابجا شده باشند به معنی این است که سیستم تمایل سینتیکی و ترمودینامیکی کمتری به خوردگی دارد. بنابراین منحنی پلاریزاسیون مربوط به نمونه M4 به شکل معنادار و قابل توجهی از بقیه منحنی‌ها در پتانسیل بیشتر و دانسیته جریان کمتری است که این به معنی کمتر بودن تمایل سینتیکی و ترمودینامیکی این نمونه به خوردگی نسبت به دیگر نمونه‌ها است. همچنین بیشتر بودن دانسیته جریان نمونه M1 نسبت به دیگر نمونه‌ها به صورت چشمی قابل مشاهده است که این موضوع نیز بیانگر کمتر بودن مقاومت به خوردگی این نمونه نسبت به دیگر نمونه‌ها است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-07-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.03]

شکل (9-ب) منحنی‌های نایکوییست(Z’ برحسب Z”) مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده M1 تا M6 آورده شده است. در منحنی نایکوییست فرکانس به صورت پاد ساعت‌گرد افزایش پیدا می‌کند، بنابراین هر چه که به مبدا مختصات نزدیک می‌شویم، فرکانس افزایش و هر چه به صورت ساعتگرد روی نمودار حرکت کنیم، فرکانس کاهش می‌یابد.



شکل9-الف- منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، ب- نایکوییست (Z' بر حسب Z") حاصل از آزمون EIS، ج- منحنی باد-زاویه فاز نمونه‌های جوشکاری شده نمونه‌های M1 تا M6.

در اغلب منحنی‌ها دو حلقه خازنی در بالای محور افقی و یک حلقه القایی در پایین این محور دیده می‌شود. یکی از این دو حلقه خازنی مربوط به پوشش تشکیل شده بر روی سطح فلز و بنابراین مقاومت موازی با آن بیانگر مقاومت به خوردگی نمونه‌ها می‌باشد و حلقه دیگری وابسته به انتقال بار در فصل مشترک فلز/الکترولیت است و مقاومت معادل آن به مقاومت انتقال بار بستگی دارد. هرچقدر قطر این حلقه‌ها بیشتر شود، مقاومت نمونه‌ها در برابر خوردگی افزایش پیدا می‌کند [26]. برای حلقه القاگر هنوز تعریف فیزیکی جامع و کاملی ارائه نشده است و اغلب این پدیده به جذب و دفع یون‌ها و محصولات خوردگی موجود در محلول بر روی سطح الکترود ربط داده می‌شود [20]. در نتیجه با توجه به منحنی‌های نایکوییست، نمونه M4 در میان بقیه نمونه‌های بررسی شده دارای ماکزیمم قطر نیم دایره و هم‌چنین بالاترین مقاومت و انتقال بار می‌باشد. با توجه به منحنی، دو نمونه M1 و M5 دارای کمترین مقدار این پارامتر هستند.

یکی دیگر از نمایش داده‌های حاصل از آزمون EIS که می‌تواند اطلاعات مفیدی جهت تحلیل سیستم ایجاد نماید منحنی باداست. نمودارهای باد مربوط به نمونه‌های مورد بررسی در شکل(9-ج) آمده است. در آزمون EIS برای تحلیل هر چه بهتر سیستم، منحنی‌های باد اطلاعات مفیدی را ارائه می‌دهند.

ترسیم این نمودار به این صورت است که مدول امپدانس (√(Z’2 + Z”2)) به صورت |Z| بر حسب لگاریتم فرکانس و در سمت دیگر قرینه زاویه فاز ((Arc tan(Z”/Z’)) بر حسب لگاریتم فرکانس رسم می‌شود. برتری این روش نسبت به روش نایکوییست نشان دادن مقادیر فرکانس از روی نمودار است. اثبات می شود که امپدانس در کمترین فرکانس در منحنی‌های باد بیانگر مقاومت کل سیستم است [24]. تغییرات این مقدار نشان می‌دهد که مقاومت کل سیستم در نمونه M4 به شکل قابل توجهی از دیگر نمونه‌ها بیشتر است به طوری که مقاومت دیگر نمونه‌ها با مقدار مقاومت این نمونه تقریبا قابل مقایسه نیست. این بیشتر بودن قابل توجه مقاومت در منحنی‌های نایکوئیست نیز مشاهده شده بود. در بین دیگر نمونه‌ها نیز به

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-07-12]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.03]

نظر می‌رسد مقاومت نمونه M2 از بقیه بیشتر و مقاومت نمونه M1 از بقیه کمتر است. در شکل (9-ب) Rs مقاومت محلول Rfو Cf به ترتیب مقاومت و ظرفیت خازن فیلم پوشش حاصل از محصولات خوردگی وRct وCdl به ترتیب مقاومت انتقال بار از لایه دوگانه و ظرفیت خازن لایه دوگانه می‌باشد. همچنین Lو Rl به ترتیب القاگر و مقاومت انتقال بار القاگر می‌باشد. در این مدار به جای خازن ایده آل از عنصر فاز ثابت استفاده شده است [26].

4-نتیجه‌گیری

در این تحقیق جوشکاری اصطکاکی منیزیم AZ31 به آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V جهت کاربردهای ارتوپدی انجام و ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال در شرایط مختلف اتصال‌دهی ارزیابی شد. مطالعات ریزساختاری نشان می‌دهد که سمت آلیاژ منیزیم AZ31 از سه منطقه تبلور مجد دینامیکی(DRX)، منطقه تحت تأثیر ترمو مکانیکی (TMAZ) و منطقه جزیی تغییر شکل یافته (PDZ) شکل گرفته است. در حالی‌که هیچ تغییر شکلی در سمت تیتانیوم مشاهده نشده است. در خط اتصال ترکیبات بین فلزی قابل توجهی از Mg_2AlZn و Ti3Al شناسایی شد. بالاترین استحکام برشی برای نمونه جوشکاری شده با شرایط سرعت دوران 1200 دور بر دقیقه، فشار اصطکاک 50 مگاپاسکال و فشار فورج40 مگاپاسکال و به میزان 81/5 مگاپاسکال است. همچنین بررسی رفتار خوردگی نشان داد که این نمونه دارای مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد و برای ساخت پیچ‌های دوجنسی برای کاربردهای ارتوپدی توصیه می‌شود.

منابع

1-Kulekci, M. K., " Magnesium And Its Alloys Applications in Automotive Industry ", *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 39, pp. 851-856, 2008.

2-Tang, Y., Zhao, X., Jiang, K., Chen, J., Zuo, Y., " The Influences of Duty Cycle on the Bonding Strength of AZ31B Magnesium Alloy by Microarc Oxidation Treatment ", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, pp. 1789-1792, 2010.

3-Wang, Y. M. , Guo, J. W., Shao, Z. K., Zhuang, J. P. , Jin, M. S., Wu, C. J. , Wie, D. Q., Zhoua, Y., " A Metasilicate-Based Ceramic Coating Formed on Magnesium Alloy By Microarc Oxidation and Its Corrosion in Simulated Body Fluid", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 219, pp. 8-14, 2013.

4-Kumar, K., Gill, R., Batra, U.,"Challenges And Opportunities for Biodegradable Magnesium Alloy Implants", *Materials Technology*, Vol.2, pp.153-172, 2018.

5-Li, M., Ren, L., Li, L., He, P., Lan, G., Zhang, Y., Yang, K., "Cytotoxic Effect on Osteosarcoma MG-63 Cells by Degradation of Magnesium", *Materials Science & Technology*, Vol.30, No. 9, pp.888-893, 2014.

6-Poinern, G. E., Brundavanam, S., Fawcett, D., "Biomedical Magnesium Alloys: A Review of Material Properties, Surface Modifications and Pote Ntial as A Biodegradable Orthopaedic Implant", *Biomedical Engineering*, No. 2, pp. 218-240, 2012.

7-Chen, Q., Thouas, G. A., "Metallic Implant Biomaterials", *Materials Science and Engineering R*, pp. 1-57, 2015.

8-Waizy, H., Seitz, J. M., Reifenrath, J. , Weizbauer, A., Bach ,F. W., Meyer-Lindenberg, A., B. Denkena, H. Windhagen, "Biodegradable Magnesium Implants for Orthopedic Applications", Materials Science, Vol.48, No. 1, pp.39-50, 2013.

9-Crosby, K. D. (2013). "Titanium-6Aluminum-4Vanadium for functionally graded orthopedic implant applications." https://opencommons.uconn.edu/dissertations/218.

10-Song, Y., Shan, D., Chen, R., Zhang, F., Han, E. H., "Biodegradable Behaviors of AZ31 Magnesium Alloy in Simulated Body Fluid", *Materials Science and Engineering: C*, Vol.29, No. 3, pp.1039-1045, 2009.

11-Zhou, L., Nakata, K., Liao, J., Tsumura, T., " Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Non-Combustive Mg–9Al–Zn–Ca Magnesium Alloy Friction Stir Welded Joints", *Materials and Design*, Vol. 42, pp. 505-512, 2012.

12-Lakshminarayanan, A., Saranarayanan, Srinivas, R., V. K., Venkatraman, B., "Characteristics of Friction Welded AZ31B Magnesium–Commercial Pure Titanium Dissimilar Joints", *Magnesium and Alloys*, Vol.3, No. 3, pp.315-321, 2015.

13-Li, W., Vairis, A., Preuss, M., Ma, T.,"Rotary Friction Welding Review", *International Materials*, Vol.61, No. 2, pp.1 -30, 2016.

14-Luo, Z., Hao, Z., Ni, D. R., Xu, Z., "Friction Stir Welding Effect on Transverse Rigidity and Sound Transmission Characteristics of AZ31B Magnesium Alloy", *Transactions of Tianjin University*, Vol.21, pp.64-68, 2015.

15-Li R D, Long L J, Tao X J, Sheng Z F, Ke Z, Zhong J C. Friction heat production and atom diffusion behaviors during Mg−Ti rotating friction welding process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012 22: 2665−2671.

16-Mojtaba Sadeghi G. M., M. Kasiri-asgarani, H. R.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-07-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.03]

22- LI W, VAIRIS A, PREUSS M, MA T. Linear and rotary friction welding review. International Materials Reviews, 2016, 61(2): 1−30.

23-J.L.Murray, "The Mg−Ti (Magnesium-Titanium) system", Bull Alloy Phase Diagrams Vol. 7, pp. 245-248, 1986.

24- Gogheri, M. S., et al. (2020). "In Vitro Corrosion Behavior and Cytotoxicity of Polycaprolactone–Akermanite-Coated Friction-Welded Commercially Pure Ti/AZ31 for Orthopedic Applications." Journal of Materials Engineering and Performance 29(9): 6053-6065.

25- Li R D, Long L J, Tao X J, Sheng Z F, KE Z, Zhong J C. Friction heat production and atom diffusion behaviors during Mg−Ti rotating friction welding process. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012,

26-Sadeghi. M., Kasiri, M., Bakhsheshi-Rad, H.R., Ghayiur, H., Rafiei, M., "Mechanical properties, corrosion behavior and biocompatibility of orthopedic pure titanium−magnesium alloy". Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020,30 (2952-2966).

Bakhsheshi-rad, H. Ghayour, M. Rafiei, "Friction heat production and atom diffusion behaviors during Mg-Ti rotating friction welding process", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol.30, pp.2952-2966, 2020.

17-American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ASTM International, ASTM E407-2017, 2017.

18-American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test Method for Shear Modulus at Room Temperature, ASTM International, 2017

19-American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International, 2017.

20-American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements, *ASTM International*, 2017.

21-Fukumoto S, Tanaka S, Ono T, Tsubakino H, Tomita T, Aritoshi M, Okita K. Microstructural development in friction welded AZ31 magnesium alloy. Materials Transactions, 2006, 47(4): 1071−1076.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-07-12]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.03]