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



The effect of the FSW variables on the microstructure and mechanical properties of the AZ91/CP-Ti joint

P.Chamani[1], H. Sabet[*1], M.Ghanbari Haghighi[2]

1- Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.
2- Advanced Materials Engineering Research Center, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

Received 21 February 2023 ; Accepted 18 June 2023

Abstract

In this study the effect of rotational speed and tool angle parameters on the microstructure and mechanical properties of the AZ91/CP-Ti joint was investigated, for this reason the sheets with 4 x 26 x 100 mm dimensions were prepared and joint by FSW with different rotational speed (800, 1200 and 2500 rpm) and the tool angle (0.5, 1 and 3 degrees). After joining, the samples were cut and prepared for study of microstructural and mechanical properties. OM and SEM examination shows that the structure of AZ91/CP-Ti nugget zone includes alpha grains and the microstructure of the mix zone on the AZ91 side includes α-magnesium coaxial grains with Mg17Al12 intermetallic compounds. The results of the tensile test show that the maximum tensile strength value (160 MPa) related to the rotation speed of 2500 rpm and the tool angle of 1 degree. It was also determined that the rotation speed of 800 rpm was not suitable for joining of AZ91/CP-Ti. On the other hand, it was observed that by increasing the tool angle the work piece, initially leads to an increases the strength from 141 MPa to 160 MPa and then decreases to 132 MPa. the results of the Vickers hardness test show that the average of the nugget zone hardness was to 173, which is higher than the hardness of AZ91 alloy (61 Vickers) and near to the hardness of CP-Ti (167 Vickers).

Keywords:FSW, AZ91, CP-Ti, Rotational speed, Tool angle.

Corresponding Author: h-sabet@kiau.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.05]

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 اثر متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ AZ91 به تیتانیوم خالص تجاری

پدرام چمنی[1]، حامد ثابت[1*]، محسن قنبری حقیقی[2]

1-گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

2-مرکز تحقیقاتی مهندسی مواد پیشرفته ،واحد کرج ، دانشگاه آزاد اسلامی ، کرج ، ایران.

دریافت مقاله: 1402/02/27 ؛ پذیرش مقاله: 1402/06/01

چکیده

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای سرعت چرخشی و زاویه ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ AZ91 منیزیم به تیتانیوم خالص تجاری، ورق هایی در ابعاد 4×26×100 میلیمتر آماده سازی شدند. پارامترهای متغیر در این مطالعه سرعت چرخشی (800، 1200 و 2500 دور بر دقیقه) و زاویه ابزار (0/5، 1 و 3 درجه) تعیین شده و سرعت پیشروی ثابت و برابر 32 میلیمتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. پس از اجرای جوشکاری نمونه‌ها جهت انجام بررسی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی (سختی و کشش) بر طبق استاندارد مربوطه آماده سازی شدند. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که ساختار ناحیه جوش CP-Ti/AZ91 شامل دانه‌های کشیده آلفا بوده و ریزساختار منطقه اختلاط یافته در سمت آلیاژ منیزیم شامل دانه‌های هم محور α - منیزیم همراه با ترکیبات بین فلزی Mg17Al12 در زمینه می‌باشد. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان داد که بیشترین مقدار استحکام کششی (160 مگاپاسکال) مربوط به سرعت چرخشی 2500 دور بر دقیقه و زاویه پین 1 درجه می‌باشد. همچنین مشخص شد که سرعت چرخشی 800 دور بر دقیقه همراه با سرعت پیشروی 32 میلیمتر بر دقیقه جهت جوشکاری نمونه‌های AZ91 به تیتانیوم خالص تجاری مناسب نبوده بطوری‌که این نمونه‌ها در حین فرایند آماده‌سازی دچار شکست شدند. از طرفی مشاهده شد که افزایش زاویه ابزار نسبت به قطعه کار در ابتدا منجر به افزایش استحکام قطعه از 141 مگاپاسکال به 160 مگاپاسکال شده و سپس تا 132 مگاپاسکال کاهش می‌یابد. از طرف دیگر نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی ویکرز نشان داد که عدد سختی منطقه جوش به طور میانگین برابر 173 ویکرز بوده و از سختی آلیاژ AZ91(61 ویکرز) بیشتر و به سختی آلیاژ تیتانیوم (167 ویکرز) نزدیک می‌باشد.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلیاژ AZ91، تیتانیوم خالص تجاری، سرعت چرخشی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h-sabet@kiau.ac.ir

1- مقدمه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توجه بسیار زیادی را در صنعت جوشکاری به سبب ایجاد اتصال با استحکام بالا بین فلزات سبک به خود اختصاص داده است[1]. در روش اصطکاکی اغتشاشی مواد پایه از طریق حرارت ناشی از اصطکاک و تغییرشکل پلاستیکی در دمای کمتر از نقطه ذوب آلیاژهای مربوطه، به یکدیگر متصل می‌شوند[2و3]. حرارت حاصل در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کمتر از روش جوشکاری ذوبی می‌باشد. در این حالت مواد پایه بدون استفاده از ماده پرکننده به یکدیگر اتصال می‌یابند. در اتصال فلزات

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.05]

غیرهمجنس از طریق جوشکاری ذوبی، چالش‌های بسیاری وجود داشته که به عنوان مثال می‌توان به ترد شدن فصل مشترک اتصال جوش به سبب تشکیل ترکیب بین‌فلزی در درز جوش اشاره کرد [4 و 5]. در روش جوشکاری حالت جامد نیاز به حرارت نبوده و فشار لازم جهت اتصال‌دهی در این روش از طریق اصطکاک بین پین در حال چرخش و قطعه کار ایجاد شده که این امر منجر به نرم شدن منطقه اطراف پین می‌گردد[6]. درحالی‌که پین در امتداد خط اتصال در حال چرخش می‌باشد، به طور مکانیکی سبب اتصال دو قطعه فلزی شده و فلز داغ و نرم شده را توسط فشار مکانیکی اعمالی از سوی پین، فورج می‌کند [7و8]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روش اتصال‌دهی جامد و مناسبی جهت جلوگیری از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی در اتصال بوده و از طرفی به سبب عدم وجود فرایند ذوب و انجماد، اتصال آلیاژهای غیرهمجنس با سهولت بیشتری اجرا می‌گردد [9و10]. منیزیم دارای بالاترین نسبت استحکام به وزن در میان فلزات تجاری بوده و آلیاژهای آن دارای خواصی همچون چگالی کم و مقاومت به خوردگی عالی، خواص مکانیکی در دماهای بالا می‌باشند و از این رو آلیاژهای منیزیم در صنایع خودروسازی و هوافضا بسیار مورد توجه هستند [11و12]. اتصال غیرهمجنس منیزیم با سایر آلیاژها سبب کاهش وزن قطعه نهایی خواهد شد [13]. براساس تحقیقات انجام شده [16-14] در ارتباط با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تیتانیوم به منیزیم، آلومینیوم به عنوان یک عنصر آلیاژی در آلیاژ Mg-Al-Zn به سبب تاثیر آن بر ضخامت لایه بین‌فلزی ایجاد شده، می‌تواند نقش مهمی را در استحکام اتصال ایفا کند. آنوما و همکارانش [17] تحقیقاتی را درباره اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای منیزیم و تیتانیوم انجام دادند و اعلام کردند که آلومینیوم نقش مهمی را در اتصال منیزیم/تیتانیوم ایفا کرده و افزایش ضخامت لایه بین‌فلزی حاصل از آن می‌تواند سبب کاهش استحکام کششی گردد. علت این امر آن ترد بودن لایه بین‌فلزی ایجاد شده در فصل مشترک اتصال عنوان شده است. ایوازکو و همکارانش [18] گزارش نمودند که فرایند اصطکاکی اغتشاشی سبب اصلاح کامل دانه‌های منیزیم AZ91 شده و حضور دانه‌های هم‌محور بسیار ظریف در ناحیه اختلاط یافته در نتیجه تبلور مجدد دینامیکی ماده می‌باشد. رشاد و همکارانش [19] نیز مطالعه‌ای را درباره اثر زاویه ابزار بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تیتانیوم خالص تجاری انجام دادند. آن‌ها تحقیقات بسیاری را در زوایای مختلف ابزار و بررسی فرایند پس از جوشکاری قطعات انجام دادند. رشاد و همکارانش به این نتیجه رسیدند که زاویه ابزار1 درجه نسبت به قطعه کار بهترین نتیجه را از نظر خواص مکانیکی و عاری از عیب بودن اتصال جوش بدست می‌دهد. درتحقیقی که حدادپور و همکارانش [20] بر روی مکانیزم‌های توسعه ریزساختار منطقه سختکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ AZ91 منیزیم انجام دادند، مشخص شد که ناحیه اختلاط یافته بدلیل تغییر شکل پلاستیک شدید و حرارت ایجاد شده، تبلور مجدد دینامیکی رخ داده و این موضوع سبب اصلاح دانه‌ها در این منطقه می‌شود. پیش از این اتصال آلیاژهای منیزیم به سایر آلیاژها بطور مکرر مورد بررسی قرار گرفته است اما تا بحال تحقیق کاملی در ارتباط با اتصال آلیاژ منیزیم به تیتانیوم در پارامترهای مختلف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و بررسی خواص مکانیکی آن انجام نشده است. بطور کلی هدف از این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای سرعت چرخشی و زاویه پین بر خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال آلیاژ AZ91 منیزیم به تیتانیوم خالص تجاری می‌باشد.

2- روش تحقیق

آلیاژهای مورد استفاده در این تحقیق شامل ورق آلیاژی تیتانیوم خالص تجاری و آلیاژ منیزیم AZ91 می‌باشند. ترکیب شیمیایی حاصل از آنالیز اسپکتروسکوپی نشر نوری این آلیاژها در جداول(1 و 2) ارائه شده است. ابعاد ورق‌ها جهت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برابر 4× 26 ×100 میلیمتر بودند. جنس ابزار مورد استفاده، تنگستن کارباید با سختی 1600 HV بوده و به سبب ایجاد اختلاط مناسب در منطقه اتصال از نوع استوانه‌ای مستقیم انتخاب شد. در شکل(1) تصویر مربوط به فیکسچر و ابعاد ابزار مورد استفاده ارائه شده است. در جدول(3)

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.05]

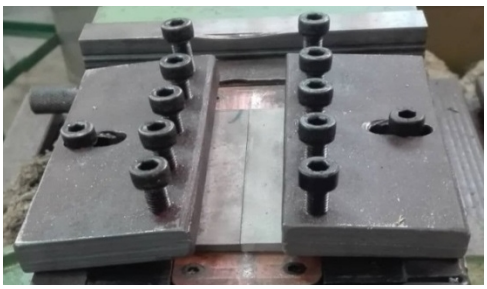
پارامترهای متغیر و شرایط نمونه‌های مورد بررسی ارائه شده است. اصلی‌ترین نقش پین، ایجاد اختلاط بین قطعه کار و آلیاژهای پایه بوده که اثر بسزایی را در کیفیت اتصال نهایی بوجود می‌آورد. مقدار زاویه ابزار به عنوان پارامتری تعیین کننده در ایجاد سیلان ماده در جهت بهبود خواص اتصال نهایی از پیش اثبات شده اما نیاز است تا مقدار بهینه و مناسب آن نیز تعیین گردد [7]. از طرف دیگر سرعت چرخشی ابزار نیز می‌تواند به سیلان هر چه بیشتر مواد پایه کمک کرده و در بهبود خواص مکانیکی اتصال جوش نهایی تاثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. از این رو سعی بر آن شد تا تاثیر همزمان این دو عامل بررسی شده و به سبب افزایش دقت اجرای فرایند اصطکاکی اغتشاشی و تحلیل نتایج نهایی، سرعت خطی ثابت درنظر گرفته شد. محل استقرار ابزار در وسط دو ورق بوده و سرعت‌های چرخشی و زوایای ابزار باتوجه به منابع و مطالعات صورت گرفته پیشین [6و7] انتخاب شده است. جهت بررسی ریزساختار ناحیه اغتشاش یافته و مناطق مجاور آن، نمونه‌هایی از منطقه مذکور، جهت متالوگرافی آماده گردید. بدین منظور نمونه‌ها سنباده‌زنی شده و با استفاده از نمد مخصوص، پولیش شدند. سپس نمونه‌ها توسط محلول‌های حکاکی 4% HF و نایتال 2 درصد و بر طبق استاندارد ASTM A561 جهت آشکار سازی ریز ساختار آلیاژ، اچ شده و با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل Olympus CX مورد بررسی قرار گرفتند. جهت اطمینان از صحت فرایند جوشکاری انجام شده و عدم وجود عیوب ظاهری، نمونه‌ها پس از آماده‌سازی تحت ماکروگرافی قرار گرفتند. بدین منظور از میکروسکوپ استریو با بزرگنمایی حداکثر 20 برابر و مدل ZSM1001 استفاده شد. لازم به توضیح است که جهت محاسبه اندازه دانه‌ها از نرم‌افزار Image J استفاده شد. جهت تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی و اجرای آنالیز EDS از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Sceron در ولتاژ کاری 30 kV و از حالت عکس‌برداری الکترون‌های ثانویه استفاده شد. جهت بررسی فازهای موجود در نمونه‌های مورد بررسی نیز از آزمون پراش پرتو ایکس با دستگاه مدل PW1730 با طول موج $\lambda Cu_{k\alpha}$ و زمان توقف برابر 0/5 ثانیه استفاده شد. آزمون سختی سنجی به روش ویکرز و مطابق با استاندارد ASTM E384 (2017) و با استفاده از دستگاه Innova test Nexus انجام شد. سختی سنجی قطعات در منطقه دکمه جوش و مناطق مجاور انجام شد. در این روش از فرورونده هرم الماسه با نیروی اعمالی 300 گرم استفاده شد به‌طوری‌که مدت زمان اعمال نیرو در محدوده 10 تا 15 ثانیه بود. جهت انجام آزمون کشش، نمونه‌های جوشکاری شده برطبق استاندارد ASTM E8 و توسط فرایند وایرکات عمود بر خط جوش و در ابعاد 10×4 میلیمتر از نمونه‌ها تهیه شدند. به منظور دقت در جواب آزمون‌ها در هر حالت 2 نمونه آماده‌سازی شد. در شکل(2) شماتیک جهت نمونه‌های استخراجی نسبت به خط جوش نشان داده شده است.

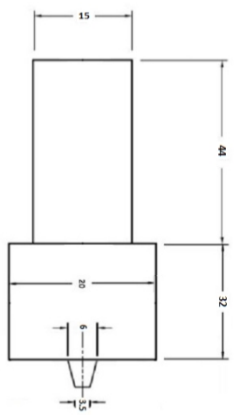
جدول 1- ترکیب شیمیایی تیتانیوم خالص تجاری برحسب درصد وزنی.

	Al	V	Cr	C	Fe	Ti
تیتانیوم خالص تجاری	۰/۰۰۵	۰/۰۱۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۰	۰/۰۵۳	باقی‌مانده

جدول 2-ترکیب شیمیایی آلیاژ AZ91 منیزیم برحسب درصد وزنی.

	Al	Mn	Si	Zn	Fe	Mg
AZ91	۹/۰۰	۰/۳۲	۰/۰۷	۰/۱۴	<۰/۰۱	باقی‌مانده





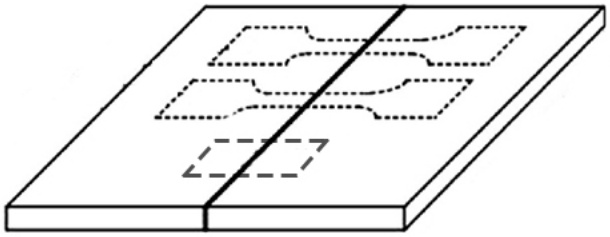
شکل 1- تصویر مربوط به الف- فیکسچر و ب- ابزار مورد استفاده .

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.05]

جدول 3- شماره و مشخصات نمونه‌های مورد آزمون.

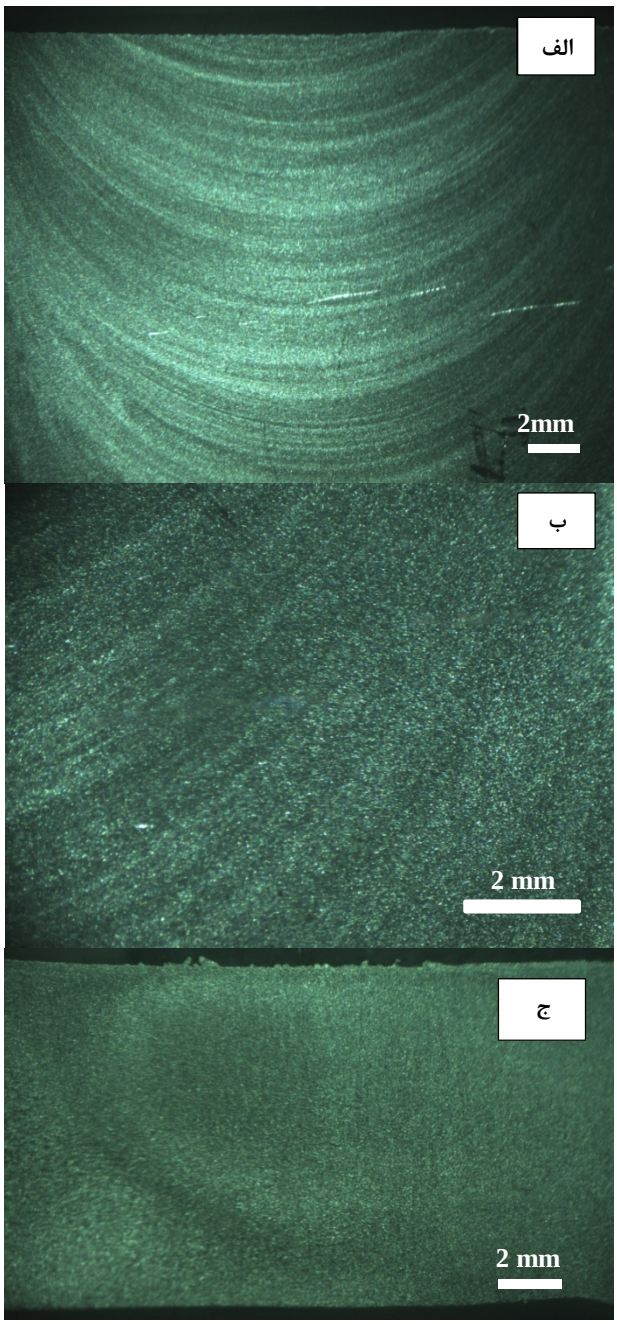
شماره نمونه	سرعت چرخشی (دور بر دقیقه)	زاویه ابزار (درجه)
1	800	0/5
2	800	1
3	800	3
4	1200	0/5
5	1200	1
6	1200	3
7	2500	0/5
8	2500	1
9	2500	3



شکل 2- شماتیک جهت نمونه‌برداری نمونه‌ها نسبت به مرز جوش.

3- نتایج و بحث

در شکل(3) تصاویر ماکروگرافی تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ استریو از سطح جوش و مقطع آن در نمونه6 (1200 دور بر دقیقه - 3 درجه) و 7 (2500 دور بر دقیقه - 0/5 درجه) ارائه شده است. نمونه‌های نشان داده شده در شکل 3 ظاهر قابل قبولی داشته و عاری از ترک بودند. اندازه منطقه ناگت جوش در نمونه‌های 7، 8 و 9 با سرعت‌های چرخشی 2500 دور بر دقیقه و زوایای ابزار 0/5، 1 و 3 درجه بترتیب حدود 1/5، 1/2 و 1 سانتیمتر اندازه‌گیری شد. شکل(4) تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از منیزیم AZ91 ارائه شده است. شکل(5) پراش پرتو ایکس از آلیاژ AZ91 را نشان می‌دهد. در شکل(4) تصویر ریزساختاری تهیه شده از نمونه آلیاژی منیزیم بهمراه دیاگرام فازی آن ارائه شده است. براساس ترکیب شیمیایی آلیاژ AZ91 و نیز دیاگرام فازی Mg-Al که در شکل(4-ب) نشان داده شده است، ریزساختار این آلیاژ شامل دانه‌های α- منیزیم همراه با فاز یوتکتیک ثانویه $Mg_{17}Al_{12}$ می‌باشد که همان‌گونه که در شکل(4-الف) مشاهده می‌شود، این فاز در مرزدانه‌ها توزیع شده است.



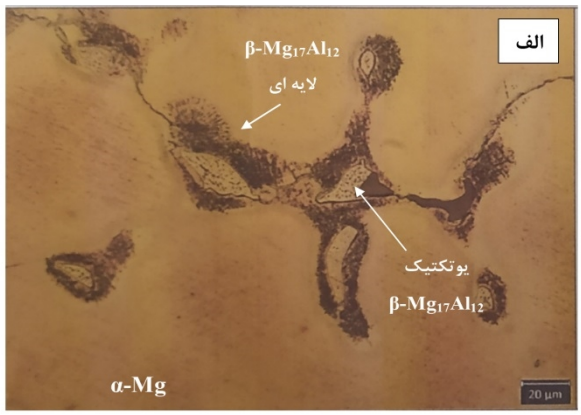
شکل 3- تصاویر تهیه شده از نمونه‌ها الف- از سطح نمونه 6 (1200 دور بر دقیقه - 3 درجه)، ب- از سطح نمونه 7 (2500 دور بر دقیقه – 0/5 درجه)، ج- از مقطع عرضی نمونه 7.

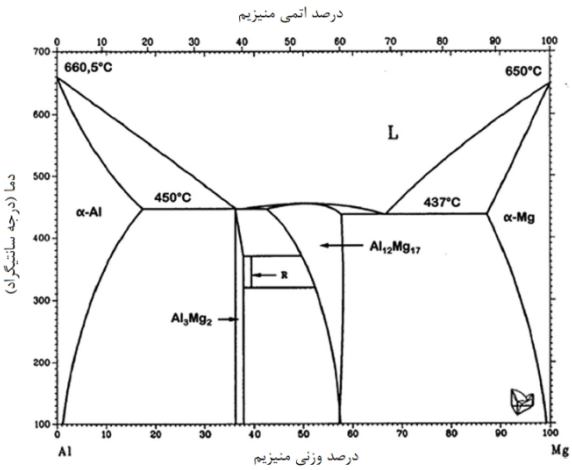
همچنین با توجه به شکل(5) و استناد به آزمون پراش پرتو ایکس ریزساختار شامل فاز AlMg نیز می‌باشد. کسر حجمی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

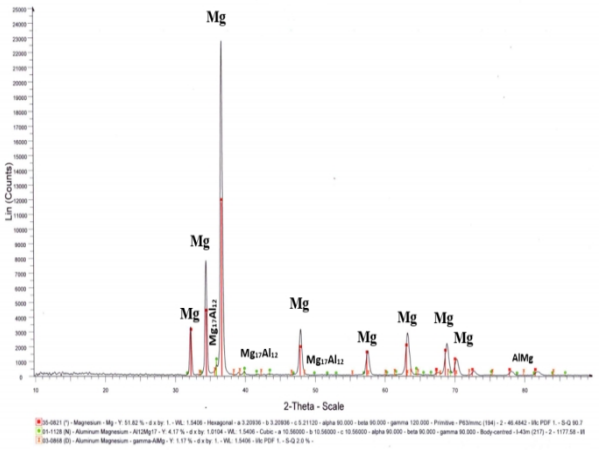
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.05]

فاز $Mg_{17}Al_{12}$ با استفاده از نرم افزار ImageJ برابر 25 درصد و اندازه دانه‌های α - منیزیم حدودا برابر 300 µm اندازه‌گیری شد. ریزساختار آلیاژ تیتانیوم خالص تجاری در شکل(6) نشان داده شده است. ریزساختار آلیاژ تیتانیوم خالص تجاری همانگونه که در شکل(6) قابل مشاهده است، حاوی دانه‌های α با اندازه میانگین 75/18 µm می‌باشد.



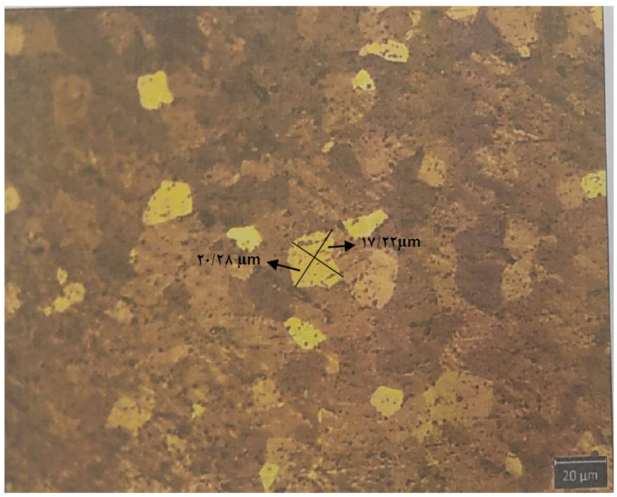


شکل 4- الف - ریزساختار آلیاژ منیزیم AZ91 و ب - دیاگرام فازی منیزیم - آلومینیوم.



شکل 5- آنالیز پراش پرتو ایکس از آلیاژ AZ91 منیزیم.

در شکل(7) تصاویر تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ نوری از نمونه‌های 4 (سرعت چرخشی 1200 دور بر دقیقه - 0/5 درجه) و 5 (سرعت چرخشی 1200 دور بر دقیقه - 1 درجه) در سمت آلیاژ تیتانیوم خالص تجاری (ناحیه TMAZ) نشان داده شده است. در شکل(8) تصویر میکروسکوپ نوری تهیه شده از نمونه 6 (1200 دور بر دقیقه - 3 درجه) در ناحیه TMAZ (ناحیه متاثر از اختلاط و حرارت) به همراه آنالیز EDS انجام شده از آن ناحیه و تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه 7 (2500 دور بر دقیقه – 0/5 درجه) قابل مشاهده می‌باشد. ریزساختار این نمونه با توجه به شکل(8-الف) شامل دانه‌های هم‌محور منیزیم بوده و باتوجه به درصد وزنی عناصر ارائه شده در آنالیز EDS می‌توان اینگونه استنباط نمود که ترکیبات بین‌فلزی از نوع $Mg_{17}Al_{12}$ نیز در ناحیه TMAZ در سمت آلیاژ AZ91 وجود داشته و کسر حجمی آن‌ها نیز در حدود 30 درصد اندازه‌گیری شد.



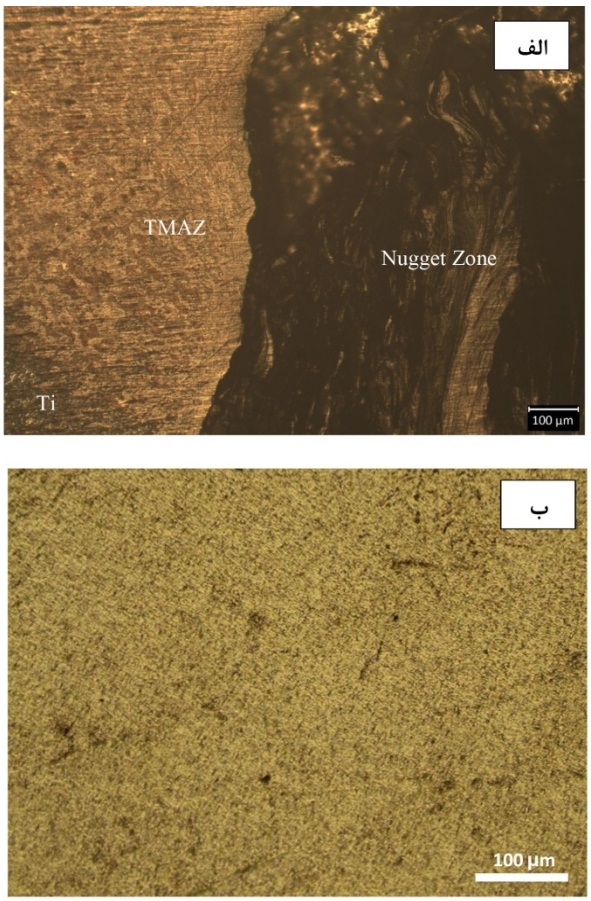
شکل 6- ریزساختار آلیاژ تیتانیوم خالص تجاری.

در شکل(8-الف) باتوجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده با استفاده از نرم افزار ImageJ اندازه دانه α - منیزیم در ناحیه TMAZ در حدوده 90 µm تا 110 µm بدست آمد. در حالی‌که با استناد به شکل(8-ج) از نمونه 7 (2500 دور بر دقیقه – 0/5 درجه)، اندازه دانه در آلیاژ پایه Mg-AZ91 در حدود 138 µm و در سمت ناحیه متاثر از اختلاط و حرارت در حدود 36 µm تا 54 µm اندازه‌گیری شد. تفاوت اعداد مربوط به اندازه دانه در دو نمونه 6 و 7 نشان‌دهنده بروز پدیده تبلور

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.05]

مجدد دینامیکی در اثر فرایند جوشکاری [17] و اختلاط ایجاد شده در نمونه 7 با سرعت چرخش 2500 دور بر دقیقه می‌باشد. در شکل(9) تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده از ناحیه جوشکاری شده نمونه 8 (2500 دور بر دقیقه – 1 درجه) و 9 (2500 دور بر دقیقه – 3 درجه) ارائه شده است. ریزساختار نمونه در این حالت شامل دانه‌های کشیده آلفا در زمینه می‌باشد. مناطق مختلف (ناحیه جوش و آلیاژهای پایه) در این تصاویر مشخص شده‌اند. همانگونه که از شکل(9-ب) مشخص است، آلیاژ AZ91 منیزیم به سبب استحکام کمتری که دارا می‌باشد، اعوجاج بیشتری از خود نشان داده و این تغییرشکل و سیلان در این تصویر بوضوح قابل مشاهده است. از میان نمونه‌های آماده‌سازی شده جهت آزمون کشش، نمونه‌های شماره 1 (800 دور بر دقیقه - 0/5 درجه) و 3 (800 دور بر دقیقه - 3 درجه) در حین عملیات آماده‌سازی و برش دچار شکست شده و امکان اجرای آزمون برای آن‌ها میسر نشد. لازم به توضیح است که سری اول نمونه‌ها (حالت‌های 1 تا 3) زاویه ابزار با قطعه کار 0/5، 1 و 3 درجه در نظر گرفته شده بود که به همین دلیل تنها نمونه شماره 2 (800 دور بر دقیقه - 1 درجه) مورد آزمون مکانیکی قرار گرفت. به نظر می‌رسد کم بودن سرعت دوران ابزار در شرایطی که سرعت پیشروی ثابت و برابر 32 میلیمتر بر دقیقه لحاظ شده است، می‌تواند دلیل دیگری جهت عدم اتصال مناسب قطعات مربوطه باشد. در شکل(10-الف و 10-ج) بترتیب تصویر دیجیتالی و ماکروسکوپی تهیه شده از نمونه 1 با زاویه ابزار 0/5 درجه و در شکل(10-ب و 10-د) بترتیب تصویر دیجیتالی و ماکروسکوپی تهیه شده از نمونه 3 با زاویه ابزار 3 درجه ارائه شده است. سرعت چرخشی در فرایند جوشکاری هر دو نمونه یکسان و برابر 800 دور بر دقیقه بوده و تنها تفاوت آن‌ها در مقدار زاویه ابزار نسبت به سطح قطعه کار می‌باشد. همانگونه که در شکل(10-د) مشاهده می‌شود، نمونه در منطقه ناگت دارای عیب بوده و به همین دلیل در حین فرایند آماده‌سازی این عیوب اشاعه پیدا کرده و منجر به شکست نمونه شده‌اند. در حالی‌که در شکل(10-ج) که از مقطع جانبی نمونه 1 تهیه شده است، منطقه ناگت تقریبا عاری از عیب بوده و شکست نمونه حین آماده‌سازی احتمالا به دلیل استحکام ضعیف اتصال ایجاد شده در سرعت پایین و زاویه پین کمتر و برابر 0/5 درجه رخ داده است.

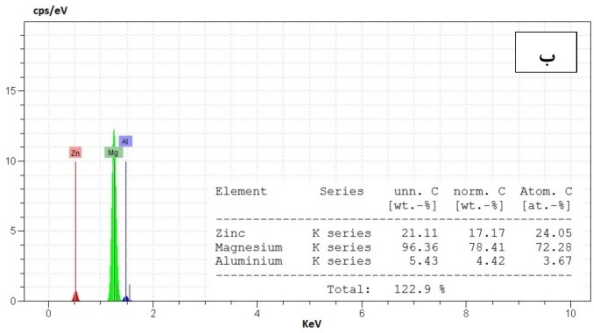


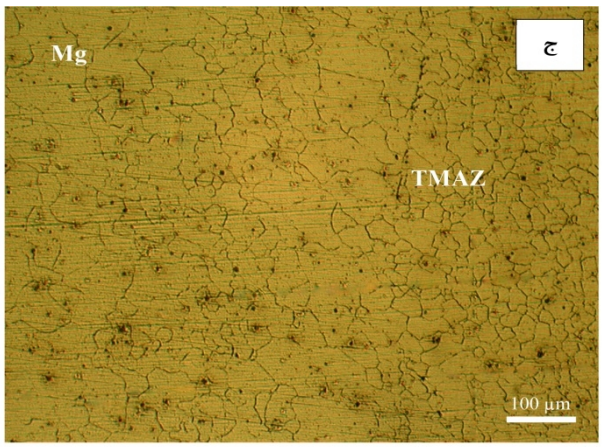
شکل 7- الف- تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه 4 (1200 دور بر دقیقه – 0/5 درجه)، ب- تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه 5 (سرعت چرخشی 1200 دور بر دقیقه - 1 درجه).

در جدول(4) و شکل(11) نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های بدون عیب در این تحقیق ارائه شده است. عدد استحکام کششی نهایی برای نمونه 2 (سرعت چرخشی 800 دور بر دقیقه و زاویه 1 درجه) برابر 70 مگاپاسکال بدست آمد. برخلاف نمونه‌های سری اول با سرعت چرخشی 800 دور بر دقیقه، سایر نمونه‌ها نتایج قابل قبولی را از خود نشان دادند. با سرعت چرخشی 1200 دور بر دقیقه نمونه‌های با زاویه ابزار 0/5 تا 3 درجه، استحکام کششی در محدوده 105 تا 126 مگاپاسکال را ارائه دادند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.05]



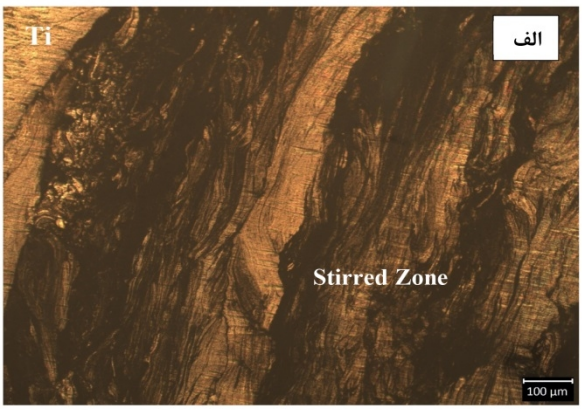


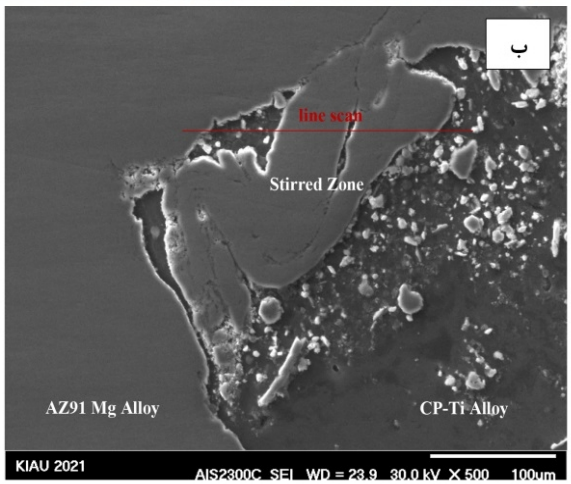


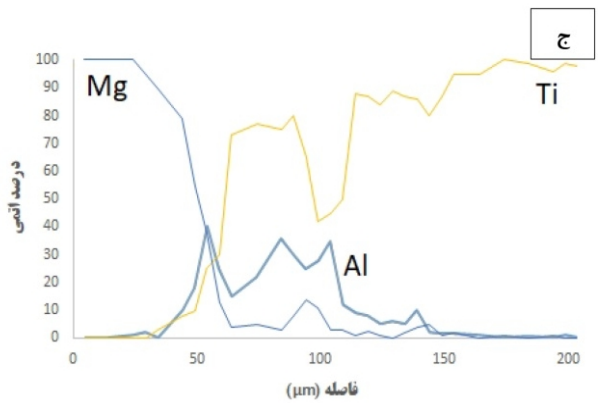
شکل 8- الف- تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه TMAZ نمونه 6 (1200 دور بر دقیقه - 3 درجه)، ب- آنالیز EDS از ناحیه TMAZ، ج- تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه TMAZ نمونه 7 (2500 دور بر دقیقه – 0/5 درجه).

در شکل(12) تصویر نمونه‌های شکسته شده طی آزمون کشش نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است، نمونه‌ها از محل جوشکاری دچار شکست شده‌اند.

براساس جدول(4) بیشترین مقدار بدست آمده برای استحکام کششی نهایی، 160 مگاپاسکال بدست آمد که این مقدار بیشینه مربوط به نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی 2500 دور بر دقیقه و زاویه ابزار 1 درجه بوده است. پس ازآن، بیشترین مقدار استحکام کششی مربوط به نمونه 7 برابر با 141 مگاپاسکال با زاویه ابزار 0/5 بوده است که این امر نشان می‌دهد سرعت چرخشی 2500 دور بر دقیقه به سبب رخداد پدیده تبلور مجدد دینامیکی و اصلاح دانه‌ها [17]، نتیجه مناسب‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها از نظر استحکام کششی بدست داده و قابلیت مقایسه با نتایج بدست آمده از مطالعات پیشین [20] را دارا می‌باشد.



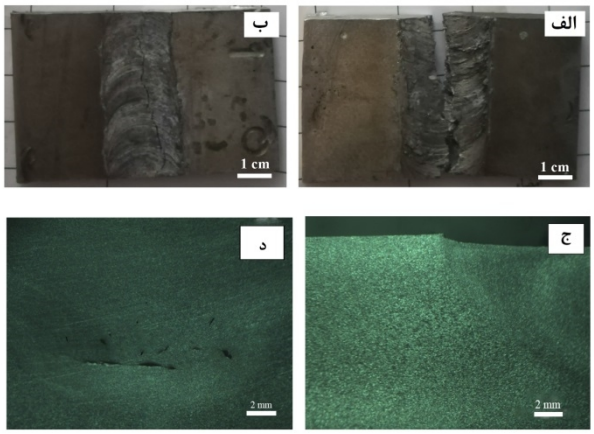




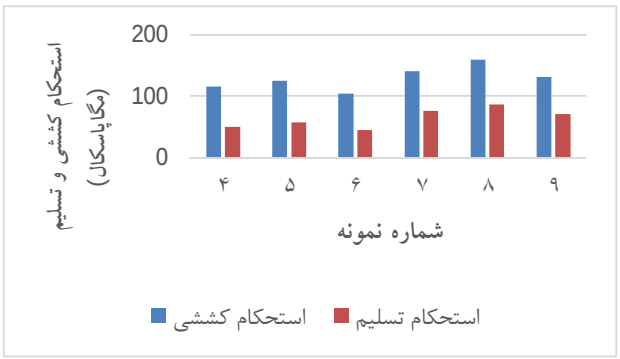
شکل 9- تصویر تهیه شده از الف- نمونه 8 (2500 دور بر دقیقه - 1 درجه) با میکروسکوپ نوری و ب- نمونه 9 (2500 دور بر دقیقه - 3 درجه) از ناحیه جوش با میکروسکوپ الکترونی روبشی، ج- آنالیز خطی در منطقه مشخص شده در تصویر ب.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

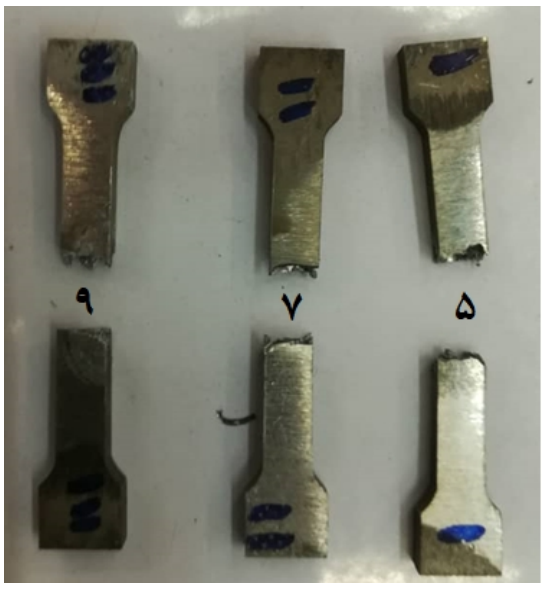
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.05]



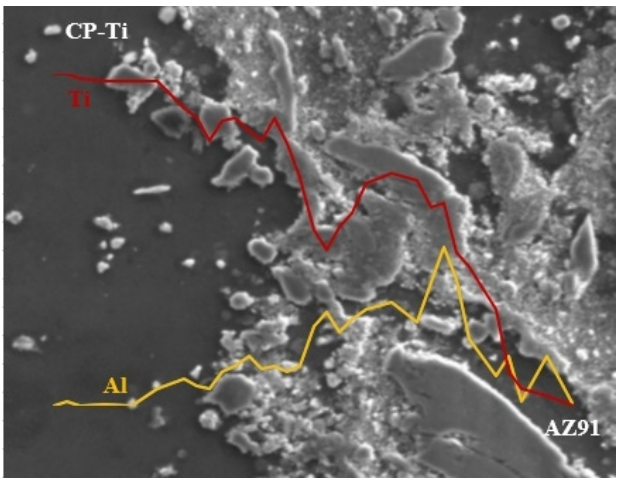
شکل 10- تصاویر مربوط به نمونه‌های 1 (زاویه پین 0/5 درجه) و 3 (زاویه پین 3 درجه) در سرعت چرخشی 800 دور بر دقیقه الف- نمونه 1 (نمای بالایی) ب- نمونه 3 (نمای بالایی) ج- نمونه 1 (نمای جانبی) د- نمونه 3 (نمای جانبی).



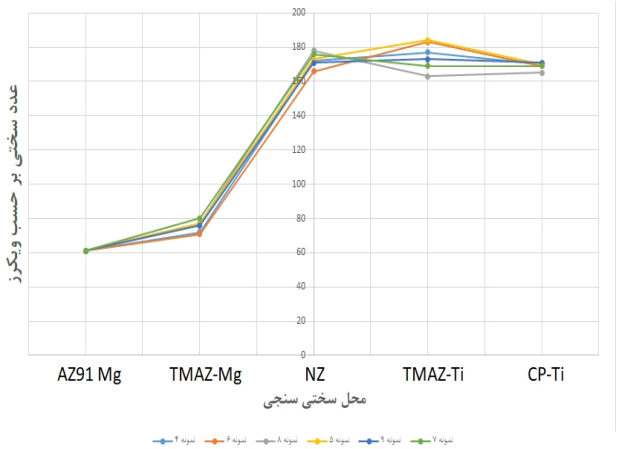
شکل 11- نمودار ستونی مربوط به آزمون کشش.



شکل 12- تصویر دیجیتالی تهیه شده از محل شکست نمونه‌های 5 (1200 دور بر دقیقه - 1 درجه)، 7 (2500 دور بر دقیقه – 0/5 درجه) و 9 (2500 دور بر دقیقه - 3 درجه).



شکل 13- آنالیز خطی مربوط به نمونه 7 (2500 دور بر دقیقه – 0/5 درجه).



شکل 14- پروفیل سختی مربوط نمونه‌های مورد بررسی در این مطالعه.

باتوجه به نتایج بدست آمده از ناحیه اتصال مشخص می‌شود که با تغییر زاویه ابزار از 0 تا 3 درجه استحکام قطعه در ابتدا از 141 مگاپاسکال به 160 مگاپاسکال افزایش و سپس به 132 مگاپاسکال کاهش یافته است. با مقایسه داده‌های ارائه شده در جدول فوق می‌توان نتیجه گرفت که افزایش زاویه ابزار تا مقدار بهینه‌ای می‌تواند به افزایش استحکام قطعه کمک کند و با افزایش هرچه بیشتر آن نتیجه برعکس خواهد شد و استحکام نمونه پس از جوشکاری کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که زاویه ابزار نسبت به قطعه کار تعیین کننده میزان پلاستیکی شدن و سیلان مواد پایه می باشد [7] و با توجه به نتایج بدست آمده در این مطالعه، در زاویه 3 درجه از شدت سیلان مواد در منطقه ناگت جوش کاسته می‌شود. در ارتباط با نمونه‌های متصل‌شده با سرعت 1200 دور بر دقیقه می‌توان مشاهده نمود که

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.05]

جدول 4- نتایج آزمون کشش نمونه‌های مورد بررسی.

شماره نمونه	پارامترهای جوشکاری	استحکام کششی نهایی (مگاپاسکال)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	محل شکست
۱	۸۰۰ دور بر دقیقه – ۰/۵ درجه	–	–	–
۲	۸۰۰ دور بر دقیقه – ۱ درجه	۷۰	–	محل جوش
۳	۸۰۰ دور بر دقیقه – ۳ درجه	–	–	–
۴	۱۲۰۰ دور بر دقیقه – ۰/۵ درجه	۱۱۶	۵۰	محل جوش
۵	۱۲۰۰ دور بر دقیقه – ۱ درجه	۱۲۶	۵۸	محل جوش
۶	۱۲۰۰ دور بر دقیقه – ۳ درجه	۱۰۵	۴۵	محل جوش
۷	۲۵۰۰ دور بر دقیقه – ۰/۵ درجه	۱۴۱	۷۶	محل جوش
۸	۲۵۰۰ دور بر دقیقه – ۱ درجه	۱۶۰	۸۷	محل جوش
۹	۲۵۰۰ دور بر دقیقه – ۳ درجه	۱۳۲	۷۱	محل جوش

افزایش زاویه ابزار با سطح قطعه کار از 0/5 تا 3 بترتیب 116، 126 و 105 مگاپاسکال بدست آمده است. در ارتباط با نمونه‌های 800 دور بر دقیقه بدلیل شکست نمونه‌ها در حین فرایند آماده‌سازی، نتیجه‌گیری امکان پذیر نبوده اما این موضوع بر نمونه‌های 2500 دور بر دقیقه نیز حاکم است. استحکام کششی اتصال اصطکاکی اغتشاشی مابین آلیاژهای تیتانیوم خالص تجاری و AZ91 منیزیم تا حد زیادی به مقدار فاز بین‌فلزی ($Mg_{17}Al_{12}$) ایجاد شده در منطقه اختلاط یافته وابسته است. بر اساس تحقیقات پیشین [15] به نظر می‌رسد که این فاز نقش بسیار مهمی را در استحکام اتصال ایفا می‌نماید بطوری‌که با افزایش ضخامت این ترکیب بین‌فلزی، استحکام کششی اتصال کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر باتوجه به مطالعات پیشین [15] و نیز آنالیز خطی ارائه شده بر روی نمونه 7 (2500 دور بر دقیقه – 0/5 درجه) (شکل 13) مشخص می‌گردد که با افزایش درصد آلومینیوم در آلیاژ منیزیم، درصد آلومینیوم در سمت تیتانیوم خالص تجاری افزایش می‌یابد. لازم به توضیح است که آنالیز خطی ارائه شده از سمت آلیاژ تیتانیوم خالص تجاری به سمت آلیاژ AZ91 منیزیم انجام شده است.

در شکل(14) نتایج بدست آمده از سختی سنجی مرز اتصال بصورت پروفیل ارائه شده است. باتوجه به شکل(13) بیشترین مقدار عدد سختی بدست آمده در ناحیه اتصال برابر 178 ویکرز (نمونه 8) و کمترین آن نیز برابر 169 ویکرز (نمونه 6) بدست آمده است. سختی آلیاژ پایه منیزیم نیز 61 ویکرز و آلیاژ تیتانیوم خالص تجاری در حدود 167 ویکرز می‌باشد. اعداد سختی بدست آمده در ناحیه اتصال در تمامی نمونه‌ها بیشتر از آلیاژ AZ91 پایه و تقریبا مشابه آلیاژ تیتانیوم خالص تجاری اندازه‌گیری شد.

سختی آلیاژ AZ91 منیزیم در مجاورت مرز اتصال (TAMZ) بیشتر از مقدار سختی آلیاژ پایه بدست آمد. برمبنای گزارش‌های پیشین [17] و نیز آنالیز خطی ارائه شده در شکل(13) (خط قرمز رنگ)، این ناحیه بدلیل اختلاط و درگیری بوجود آمده بین ابزار و ورق‌های جوشکاری، تکه‌هایی از آلیاژ تیتانیوم به این ناحیه نفوذ پیدا نموده و اندازه دانه این بخش کمتر از نواحی مربوط به آلیاژ AZ91 می‌گردد و به همین علت نیز عدد سختی در این ناحیه بطور میانگین تا 76 میکرو ویکرز افزایش یافته است. در مورد منطقه TMAZ در سمت تیتانیوم خالص تجاری نیز این موضوع تا حدی قابل مشاهده بوده و سختی این نواحی نیز از آلیاژ پایه آن بیشتر خواهد بود. بطور کلی بیشترین سختی در منطقه TMAZ-Mg مربوط به نمونه 7 (80 ویکرز) و در منطقه TMAZ-Ti مربوط به نمونه 5 (184 ویکرز) بدست آمد.

4- نتیجه‌گیری

- بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که ساختار ناحیه جوش CP-Ti/AZ91 شامل دانه‌های کشیده آلفا بوده و ریزساختار

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.05]

منطقه اختلاط یافته در سمت آلیاژ منیزیم شامل دانه‌های هم‌محور α-منیزیم همراه با ترکیبات بین‌فلزی $Mg_{17}Al_{12}$ در زمینه می‌باشد.

- نتایج آزمون کشش نشان داد که در سرعت پیشروی ثابت، به سبب اختلاط بهتر آلیاژهای پایه بیشینه استحکام کششی (160 مگاپاسکال) مربوط به سرعت 2500 دور بر دقیقه و زاویه ابزار 1 درجه می‌باشد.

- برطبق نتایج بدست آمده مشخص شد که سرعت چرخشی 800 دور بر دقیقه با سرعت پیشروی 32 میلیمتر بر دقیقه جهت جوشکاری نمونه‌های AZ91 به تیتانیوم خالص تجاری مناسب نبوده بطوری‌که این نمونه‌ها در حین فرایند آماده‌سازی دچار شکست شدند.

- نتایج آزمون خواص مکانیکی از ناحیه جوش نشان داد که با تغییر زاویه ابزار از 0 تا 3 درجه، استحکام قطعه در ابتدا از 141 مگاپاسکال به 160 مگاپاسکال افزایش یافته و سپس به 132 مگاپاسکال کاهش می‌یابد.

- نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی ویکرز نشان داد که عدد سختی منطقه جوش به طور میانگین برابر 173 میکرو ویکرز بوده و از سختی آلیاژ AZ91 (61 ویکرز) بیشتر و نزدیک به سختی آلیاژ تیتانیوم (167 ویکرز) می‌باشد.

منابع

1-Lee W., Lee C., Chang W., Yeon Y., Jung S., "Microstructural Investigation of FSW pure titanium", Materals Transaction Let, 2005, vol. 59, pp. 3315-3318.

2-Mishra R. S., Ma Z. Y.," FSW and processing", Materials Science and Engineering, Vol. R50, pp. 1-78, 2005.

3-Heidarzadeh, A., Minorov, S., et al., "Friction stir welding/processing of metals and alloys : A comprenhensive review on microstructureal evolution", Progress in Materials Science, Vol. 117, No. 100752, pp. 1-24, 2021.

4-Dialami, N., Cervera, M., Chiumenti, M., "Defect formation and material flow in friction stir welding", European journal of mechanics – A/Solids, Vol. 80, No. 103912, pp. 1-13, 2020.

5- Chen, J., Wang, X., Shi, L., "Numerical simulation of weld formation in friction stir welding based on non-uniform tool-workpiece interaction: An effect of tool pin size", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 86, pp. 85-97, 2023.

6- Jia, H., Wu, K., Sun, Y., "Numerical and experimental study on the thermal process, material flow and welding defects during high-speed friction stir welding", Materials today communications, Vol. 31, No. 103526, pp. 48-59, 2022.

7- Zhai, M., Wu, C., Su, H., "Influence of tool tilt angle on heat transfer and material flow in friction stir welding", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 59, pp. 98-112, 2022.

8- Yang, C., Wu, C., Shi, L., "Modeling the dissimilar material flow and mixing in friction stir welding of aluminum to magnesium alloys", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 843, No. 156021, pp. 1-23, 2020.

9- Chen, G., Ma, Q., Zhang, S., "Computational fluid dynamics simulation of friction stir welding: A comparative study on different frictional boundary conditions", Journal of materials science and technology, Vol. 34, Issue 1, pp. 128-134, 2018.

10-Wenya, Y., Gao, F.,"Effect of FSW process on anisotropic of titanium allou T-joint", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 37, Issue 1, pp. 25-33, 2021.

11- Gite, R. A., Loharkar, P., " Friction Stir Welding parameters and application: A review", Materialstoday: Proceedings, Vol. 19, Part 2, pp. 361-365, 2019.

12- Satheesh, C., Sevvel, P., Senthil, R,. "Experimental identification of optimized process parameters for FSW of AZ91C Mg alloy using quadratic regression models", Journal of Mechanical Engineering, Vol 66, Issue 12, pp. 736- 51, 2020.

13- Morishige, T., Kawaguchi, A., "Dissimlar welding of Al and Mg alloys by FSW", Mater. Trans.,Vol. 49, No. 5, pp. 1129-1131, 2008.

14- Zhang, M., Kelly, P., "Crystallography of γ-$Mg_{17}Al_{12}$ precipitates in AZ91D alloy", Scripta Materialia, Vol. 48, Issue 5, pp. 647-652, 2003.

15-Nakata, K., Aonuma, M., "Effect of alloying elements on interface microstructure of Mg-Al-Zn Magnesium alloys and titanium joint by friction stir welding", Materials Science and Engineering: B, Vol. 161, Issues 1-3, pp. 46-49, 2009.

16- Chen, T., Zhu, Z., Li, Y., Ma, Y., Hao, Y., "Friction stir processing of thixoformed AZ91D magnesium alloy and fabrication of Al-rich surface", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, Issue 1, pp. 34-42, 2010.

17-Aonuma, M., Morikawa, K., "Interfacial microstructure of CP-Ti and AZ31 joint by friction stir welding", Quarterly Journal of the Japan welding society, Vol. 31, No. 4, pp. 96-99, 2013.

18- Iwaszko, J., Kudla, K., "Microstructure, hardness, and wear resistance of AZ91 magnesium alloy produced

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.05]

by friction stir processing with air-cooling", The international journal of advanced manufacturing Pure technology, Vo. 116, pp. 1309-1323, 2021.
19-Reshad, S, Besharati, G., Nasiri, A.M., "Investigations on the pEffects of the Tool Material, Geometry, and Tilt Angle on Friction Stir Welding of Titanium", J. Mater. Eng. Perform, Vol. 19, pp.955-962, 2010.
20-Hadadpour, M., Mousavizadeh,S "Different mechanisms of the microstructure development by FSP of the AZ91 cast magnesium alloy" 3rd International Conference on Engineering Materials and Metallurgy-Tehran, Iran, 2014.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.05]