



بررسی ارتباط خواص مکانیکی و فصل مشترک در جوشکاری غیر مشابه آلومینیم و منیزیم به روش اصطکاکی همزنی

محمد حسن زمانی¹، مهدی دیوانداری^{2*}، مرتضی تمیزی فر²

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران

2- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران

*تهران، کدپستی 1674613114، divandari@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 آبان 1394
پذیرش: 04 بهمن 1394
ارائه در سایت: 25 بهمن 1394
کلید واژگان:
جوشکاری اصطکاکی همزنی
ترکیبات بین فلزی
خواص مکانیکی
آلومینیم
منیزیم

چکیده

با افزایش کاربرد فلزات سبک منیزیم و آلومینیم در صنایع حمل و نقل، اتصال آن‌ها به یکدیگر، به یکی از چالش‌های محققین و مهندسين تبدیل شده است. هدف از این تحقیق، بررسی ارتباط خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری اصطکاکی همزنی آلومینیم و منیزیم با خواص فصل مشترک آن‌ها در طرح اتصال لبه روی هم است. به همین منظور، اتصال آلومینیم و منیزیم در حالات مختلف قرارگیری آلومینیم-رو یا منیزیم-رو و همچنین پیشرو یا پسرو بودن لبه اتصال انجام شد. بررسی‌های میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی و همچنین آزمون‌های ریز سختی سنجی و آزمون کشش-برش بر روی اتصالات انجام گرفت. نتایج نشان داد در فصل مشترک اتصالات منیزیم-رو، لایه‌های با ضخامت تقریبی 10 میکرون از ترکیبات بین فلزی ایجاد می‌شود در صورتی که در اتصالات آلومینیم-رو، ساختار با ترکیبات بین فلزی با ضخامت تقریبی 1 میلیمتر و با ساختار انجمادی ایجاد می‌گردد. نتایج نشان داد با قرار دادن ورق منیزیم به عنوان ورق روی می‌توان استحکام اتصال را افزایش داد. تغییرات سختی در فصل مشترک اتصالات منیزیم-رو نوسان بیشتری نسبت به اتصالات آلومینیم-رو از خود نشان داد. بررسی‌های ریزساختاری نیز حاکی از آن بود که در اتصالات منیزیم-رو، مکانیزم تشکیل ترکیبات بین فلزی براساس نفوذ در حالت جامد است در صورتی که در اتصالات آلومینیم-رو، علاوه بر نفوذ در حالت جامد، تشکیل مذاب یوتکتیک و انجماد نیز بر مکانیزم تشکیل ترکیبات بین فلزی اثرگذار است.

Investigation of relationship between mechanical and interface properties in dissimilar welding of aluminum and magnesium by friction stir welding

Mohammad Hasan Zamani, Mehdi Divandari*, Morteza Tamizifar

Department of Materials Engineering, Iran University of science and Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 1674613114, Tehran, Iran, divandari@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 December 2015
Accepted 24 January 2016
Available Online 14 February 2016

Keywords:
Friction Stir Welding (FSW)
Intermetallic compounds
mechanical properties
aluminum
magnesium

ABSTRACT

Increasing usage of magnesium and aluminum light metals in the transportation industry has made joining of these two metals one of the challenges for researchers and engineers. The aim of this study was to investigate the relationship between mechanical properties of lap friction stir welded Al-Mg plates and characteristics of the interface. Therefore, joining of aluminum and magnesium in various conditions was conducted. Optical and scanning electron microscopy analysis, micro-hardness test and tensile tests were performed on samples. The results showed that in the joints where Mg was on top, an approximately 10 micron thick layer of intermetallic compounds is created, while in the Al-top joints, approximately 1 mm thick intermetallic compounds with solidified microstructure were visible. Mechanical test showed Mg-top joint has higher strength in comparison with Al-top joint. On the other hand, hardness test of Mg-top joint showed more fluctuation than Al-top joint. Microstructural investigation also showed that in the Mg-top joint, formation mechanism of intermetallic compounds has occurred in solid state while in the Al-top joint, in addition to diffusion in solid state, eutectic formation in the molten state and solidification has occurred.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از فلزات سبک آلومینیم و منیزیم به علت چگالی کم در ساخت وسایل حمل و نقل مانند هواپیما، کشتی و خودرو به شدت افزایش یافته است و به همین دلیل کاربرد آن‌ها در کنار یکدیگر، نیاز به اتصال غیر هم جنس آن‌ها را بوجود آورده است [1]. فرایند جوشکاری اصطکاکی همزنی¹ که به اختصار در این مقاله فرایند "جاه" نامگذاری می‌شود، یکی از

فرآیندهای نوین و بسیار مناسب در اتصال فلزات غیر هم جنس به شمار می‌رود.

روش‌های مختلفی برای ایجاد اتصالات آلومینیم و منیزیم قابل انجام است ولی روش‌های اتصال ذوبی، استحکام بسیار پایینی دارند که علت آن به تشکیل ترکیبات بین فلزی به صورت لایه‌های ضخیم و پیوسته در فصل مشترک مرتبط است [2-5]. به همین دلیل روش‌های ذوبی برای اتصال ورق‌های غیر هم جنس آلومینیم و منیزیم متداول و مناسب نیست. با توجه

1- Friction stir welding (FSW)

Please cite this article using:

M. H. Zamani, M. Divandari, M. Tamizifar, Investigation of relationship between mechanical and interface properties in dissimilar welding of aluminum and magnesium by friction stir welding, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 206-214, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. H. Zamani, M. Divandari, M. Tamizifar, Investigation of relationship between mechanical and interface properties in dissimilar welding of aluminum and magnesium by friction stir welding, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 206-214, 2016 (in Persian)

جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق منیزیم استفاده شده در فرآیند جوشکاری

Table 1 Chemical composition of magnesium sheet used in the welding process

عنصر	Al	Si	Fe	Zn	Mg
درصد باقیمانده	0.073	0.335	0.012	0.053	

ترکیب شیمیایی ورق آلومینیم استفاده شده در فرآیند جوشکاری

Table 2 Chemical composition of Aluminum sheet used in the welding process

عنصر	Mg	Al	Cu	Fe	Mn
درصد باقیمانده	0.056	0.018	0.012	0.033	

جهت جوشکاری طوری تنظیم شد که لبه ورق بالایی یکبار به عنوان جهت پیشرو و یکبار به عنوان جهت پسرو قرار بگیرد. فرآیندهای جوشکاری اتصالات غیرهمجنس منیزیم و آلومینیوم با سرعت چرخشی 1600 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 40 میلیمتر بر دقیقه انجام شد. نوع ورق بالایی که با شانه ابزار در تماس است نیز به عنوان متغیر جوشکاری در نظر گرفته شد. در شکل های 1 و 2 تصاویر نحوه قرارگیری ورق ها در نگهدارنده و ابزار مورد استفاده نشان داده شده است.

یکی از متغیرهای مهم و قابل مقایسه که تاثیر پسرو-لبه² یا پیشرو-لبه³ است، به صورت طرح کلی در شکل (3) نشان داده شده است. شرایط جوشکاری در شکل (الف) معرف حالت پسرو-لبه است. در این حالت جهت چرخش ابزار ساعتگرد بوده که باعث می شود پیشرو در سمت چپ و پسرو در سمت راست محور عمودی جوش قرار گیرد و چون پسرو به لبه ی ورق بالایی

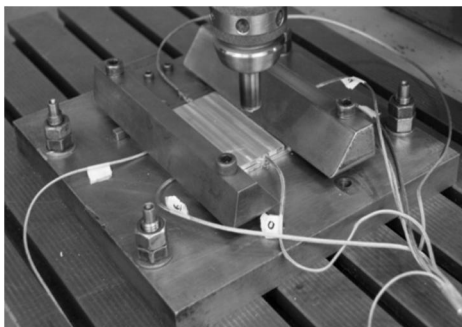


Fig. 1 Clamping fixture used for welding

شکل 1 نگهدارنده استفاده شده برای عملیات جوشکاری



Fig. 2 The FSW tool used for all the welding processes

شکل 2 ابزار مورد استفاده در پژوهش حاضر

به تحقیقات و گزارشات منتشر شده اتصال آلومینیم به منیزیم از طریق فرآیند جوشکاری برای اولین بار توسط مک لین در سال 2003 گزارش شده است [6] و محققان دیگری اتصال بین آلیاژهای مختلف آلومینیم و منیزیم از طریق فرآیند جوشکاری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات انجام شده نشان می دهد که تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد در فصل مشترک اتصال Al/Mg بر استحکام و انعطاف پذیری اتصال اثر منفی دارد [7]. به همین دلیل با روش های دیگری این کاهش خواص مکانیکی اتصال را جبران می کنند که از آن جمله می توان به کنترل ترکیب شیمیایی، افزایش اتصال مکانیکی بین دو فلز و استفاده از لایه های میانی اشاره کرد [8].

در تحقیقی که توسط فیروزدر و کو [9] انجام گرفت اثر موقعیت و محل قرار گیری ورق های منیزیم و آلومینیم نسبت به هم، بر استحکام اتصال غیر مشابه جوشکاری بررسی گردید. نتایج حاکی از این امر بود که در حالتی که آلومینیم در سمت پیش رونده بوده است نسبت به حالتی که در سمت پس رونده است، حرارت کمتری ایجاد شده است و اتصال به علت تشکیل کمتر ترکیبات بین فلزی دارای استحکام بیشتر است در صورتی که زتلر و همکاران [10] استحکام بیشتر اتصال در حالتی که منیزیم در سمت پیش رونده قرار می گیرد را گزارش نموده اند. محققانی همچون مک لین و همکاران [6]، یان و همکاران [11] و فیروزدر و کو [9] گزارش نموده اند که قرارگیری بیشتر پین در آلیاژ منیزیم، باعث ایجاد اتصال با استحکام بالاتر می شود.

استحکام اتصال برای اتصالات لبه روی هم فلزات غیر مشابه، به حد زیادی وابسته به طرح ابزار است که اثر بسیار مهمی بر فصل مشترک، شکل ناحیه اختلاط، فازها و ریزساختارهای ایجاد شده دارد. درمورد جوشکاری لبه روی هم اصطکاکی همزنی¹، اتصالات غیرمشابه آلومینیم-منیزیم، تحقیقات کمتری نسبت به طرح اتصال لب به لب انجام شده است. فیروزدر و کو [9] تشکیل ذوب جزئی در حین فرآیند جوشکاری آلیاژهای آلومینیم 6061 و منیزیم AZ31 با ضخامت های 1.6 میلیمتر را گزارش نموده اند که این پدیده ذوب جزئی باعث تشکیل ترکیبات بین فلزی ضخیم تا ضخامت بین 0.5 و 1 میلیمتر و همچنین ترک خوردگی گرم (ترک انجمادی) می گردد. در تحقیق آن ها از ابزار با پین استوانه ای رزوه دار استفاده شده است.

تشکیل ترکیبات بین فلزی در اتصالات غیر هم جنس آلومینیوم و منیزیم [12،13] و همچنین در اتصالات غیر هم جنس دیگری مانند آلومینیوم و فولاد [14] نیز گزارش شده است که اغلب مکانیزم های حالت جامد برای تشکیل آن ها ارایه شده است.

در این تحقیق، اتصالات جوشکاری آلومینیم و منیزیم با طرح اتصال لبه روی هم، مورد بررسی قرار گرفته است. نوع ورق بالایی و همچنین پیشرو یا پسرو بودن لبه ورق بالایی به عنوان متغیرهای جوشکاری در نظر گرفته شده است.

2- مواد و روش های آزمایش

در این تحقیق ورق های آلومینیم خالص و منیزیم خالص مورد استفاده قرار گرفته است. ورق آلومینیوم خالص و منیزیم خالص با ابعاد 100×65×3 میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی دو فلز مورد استفاده، در جدول 1 و جدول 2 آمده است.

تنظیم و یکسان سازی نیروی عمودی جوشکاری، با اندازه گیری میزان فروری شانه ابزار درون ورق فوقانی، انجام شد. میزان فروری برای همه نمونه های اتصال همجنس 0.1 میلیمتر در نظر گرفته شد. زاویه انحراف ابزار برای همه آزمایشات، 3.5 درجه تعیین گردید و جهت چرخش ابزار به همراه

2- Retreading Side (AS)
3- Advancing Side (RS)

1- Friction Stir Lap Welding

برای آزمایش کشش، از دستگاه کشش ساخت شرکت گالدابینی¹⁴ مدل کواسار 600¹⁵ با سرعت کشش 1 میلی متر بر دقیقه استفاده شد و برای هر نمونه میانگین سه آزمون کشش ارایه گردیده است.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی سطح مقطع جوشها

در شکل (4) تصویر درشت ساختار سطح مقطع اتصالات در دو حالت منیزیم-رو و آلومینیم-رو نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است در حالات منیزیم-رو در سمت پیشرو، رگه‌های آلومینیم از ناحیه زیر پین به سمت بالا کشیده شده است ولی تا زیر ناحیه شانه ابزار نمی‌رسد ولی در حالات آلومینیم-رو، کشیدگی رگه‌های منیزیم تا ناحیه زیر شانه ابزار اتفاق می‌افتد. نکته دیگر لایه‌های در هم تنیده آلومینیم و منیزیم در ناحیه اتصال است که دارای رنگ متفاوتی نسبت به آلومینیم و منیزیم بوده که با توجه به تحقیقات قبلی انجام شده، نشان دهنده ساختار لایه لایه ای و ترکیبات بین فلزی Al-Mg در فصل مشترک آن‌هاست. همانگونه که در شکل 4 مشخص است در اتصالات منیزیم-رو (شکل 4 الف) و (ب)) ناحیه اختلاط وسیع است در حالی که در اتصالات آلومینیم-رو (شکل 4 ج) و (د)) ناحیه اتصال وسعت کمتری دارد و متمرکز تر است.

3-2- بررسی ریزساختار و فازهای فصل مشترک اتصالات

در شکل‌های 5 و 6 تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک اتصال

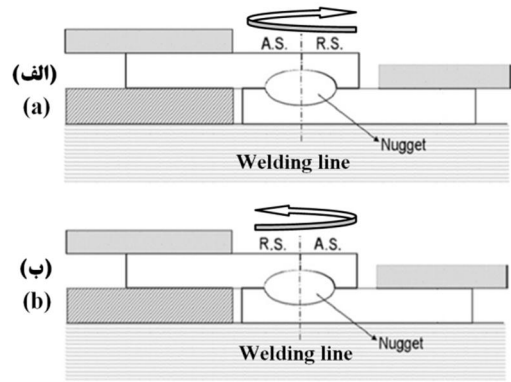


Fig. 3 Different configuration of welding according to tool rotation direction (a) Retreading edge (b) Advancing edge

شکل 3 دو حالت مختلف جوشکاری با توجه به جهت چرخش ابزار (الف) پسرو-لبه، (ب) پیشرو-لبه

نزدیک تر است به این حالت پسرو-لبه گفته می‌شود.

در شکل 6 تصاویر میکروسکوپ نوری از نواحی مختلف فصل مشترک اتصال آلومینیم-رو و قراگیری لبه اتصال در سمت پسرو نشان داده شده است.

پس از هر عملیات جوشکاری، به منظور بررسی ریز ساختار، از مقطع عمود بر ناحیه اختلاط، نمونه‌های متالوگرافی از سه ناحیه جوش تهیه شدند. نمونه‌های متالوگرافی پس از آماده سازی بوسیله سنباده زنی و پولیش در سه مرحله حکاکی شدند. مرحله اول، حکاکی نمونه‌ها با محلولی شامل 10 میلی لیتر استیک اسید، 10 میلی لیتر آب مقطر و 6 گرم اسید پیکریک در 100 میلی لیتر اتانول به مدت 10 ثانیه به منظور آشکار سازی منیزیم استفاده شد. مرحله دوم، حکاکی نمونه‌ها با محلولی شامل 20 گرم NaOH در 100 میلی لیتر آب مقطر به مدت 40 ثانیه به منظور آشکار سازی ساختار دانه‌های آلومینیم استفاده شد. مرحله نهایی، حکاکی نمونه‌ها با محلولی شامل 4 گرم $KMnO_4$ و 2 گرم NaOH در 100 میلی لیتر آب مقطر به مدت 25 ثانیه به منظور رنگی کردن Al، Mg، Al_3Mg_2 و $Al_{12}Mg_{17}$ به رنگ‌های مختلف استفاده شد [9،10]. از میکروسکوپ استروگراف ساخت شرکت صالیران برای بررسی درشت ساختار¹ و از میکروسکوپ نوری ساخت شرکت یونین² مدل ورسامت³ برای بررسی ریزساختار تا بزرگنمایی 1000 استفاده شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی⁴ با طیف سنجی تفکیک انرژی⁵ ساخت شرکت تی اسکن⁶ مدل وگا⁷ با 30KV برای اندازه گیری ترکیب شیمیایی استفاده شد. از دستگاه پراش پرتو ایکس⁸ ساخت شرکت جئول⁹ مدل جی دی ایکس¹⁰-8030 نیز برای شناسایی ترکیبات بین فلزی¹¹ استفاده شد. در این تحقیق اندازه‌گیری میکروسختی در ناحیه اتصال با استفاده از دستگاه سختی سنجی ساخت شرکت باریس¹² مدل وی-تست¹³ با دقت یک ویکرز انجام شد.

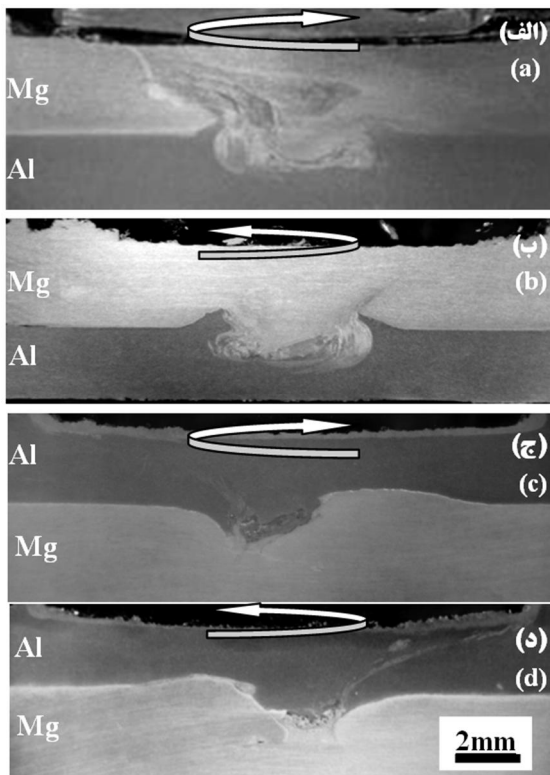


Fig. 4 Macrostructure of sections from different joints of (a) Mg top-Retreading edge (b) Mg top-Advancing edge (c) Al top-Retreading edge (d) Al top- Advancing edge

شکل 4 تصاویر درشت ساختار از مقطع اتصالات (الف) منیزیم-رو - پسرو-لبه، (ب) منیزیم-رو - پیشرو-لبه، (ج) آلومینیم-رو - پسرو-لبه و (د) آلومینیم-رو - پیشرو-لبه

- 1- Macrostructure
- 2- UNION
- 3- VERSAMET-3
- 4- SEM
- 5- EDS
- 6- TESCAN
- 7- VEGA
- 8- XRD
- 9- JEOL
- 10- JDX-8030
- 11- IMC
- 12- Bareiss
- 13- V-test

14- Galdabini
15- Quasar 600

در شکل 7 و 8، نتایج کیفی آنالیز تفکیک انرژی از ناحیه اتصال منیزیم رو و آلومینیم-رو، نشان داده شده است. در اتصال منیزیم رو (شکل 7) لایه ای از آلومینیم که در منیزیم کشیده شده است، مشخص گردیده است. همانطور که مشخص است بین لایه آلومینیم و زمینه منیزیم دو لایه مشخص است که ترکیب تقریبی آنها توسط آنالیز تفکیک انرژی مشخص شده است. لایه سمت منیزیم غنی از منیزیم (63.17 درصد منیزیم) و لایه سمت آلومینیم، غنی از آلومینیم (62.71 درصد آلومینیم) است که با تطبیق بر دیگرام فازی آلومینیم-منیزیم، نتایج حاصل از آزمون تفرق اشعه X و تحقیقات دیگر محققین نشان دهنده فازهای Al_3Mg_2 و $Al_{12}Mg_{17}$ است [13]. ضخامت کم و گرادیانی بودن غلظت آلومینیم و منیزیم نشان دهنده تشکیل شدن این فازها به صورت نفوذ در حالت جامد و در دمای بالای حاصل از فرآیند جوش است.

نتایج آنالیز تقریبی تفکیک انرژی نشان می‌دهد که فاز شبه مدور با رنگ روشن (شکل 8 (الف))، ترکیب شیمیایی با 61.48 درصد وزنی منیزیم و 38.52 درصد وزنی آلومینیم دارد. با توجه به دیگرام فازی آلومینیم-منیزیم، این فاز دارای ترکیب شیمیایی نزدیک فاز $Al_{12}Mg_{17}$ (فاز γ) است که به صورت فاز اولیه در انجماد ایجاد می‌گردد. آنالیز تفکیک انرژی ناحیه فاز زمینه با ساختار لایه لایه ای (شکل 5 (ج)) نیز نشان می‌دهد که این ساختار دارای ترکیب شیمیایی 67.61 درصد منیزیم است که به ترکیب شیمیایی ساختار یوتکتیک سمت منیزیم (دمای 437 درجه سانتیگراد) در نمودار فازی دوتایی آلومینیم-منیزیم نزدیک است و ناحیه اختلاط در فصل مشترک اتصال آلومینیم-رو، از ساختار انجمادی یوتکتیک $(Mg)+Al_{12}Mg_{17}$ تشکیل شده است [9]. چن و همکاران [12]، فیروزدر و کو [9] و چوی و همکاران [13] در اتصال غیر مشابه جوش آلومینیم و منیزیم شواهدی از حضور این ساختار انجمادی در فصل مشترک اتصالات خود، به صورت رگه‌هایی اشاره کرده اند. بررسی‌های درشت ساختار، ریزساختار و نتایج آنالیز تفکیک انرژی نشان می‌دهد در اتصالات آلومینیم-رو، حرارت حاصل از فرآیند بالاتر بوده که باعث

منیزیم-رو و آلومینیم رو نشان داده شده است. همانگونه که در شکل 5 مشخص است در اثر چرخش پین در فصل مشترک آلومینیم و منیزیم، لایه های آلومینیم و منیزیم با ساختار گردابی در یکدیگر مخلوط می‌شوند که در شکل‌های 5 (ب) و (ج)، این ساختار لایه ای نشان داده شده است. این ساختار لایه لایه ای به علت اچ رنگی لایه‌های آلومینیم (رنگ تیره) و منیزیم (رنگ روشن) و لایه بین آنها (سفید رنگ) با یکدیگر مخلوط شده اند. مقایسه شکل 5 و شکل 6 نشان می‌دهد که فصل مشترک در اتصال آلومینیم-رو متفاوت با فصل مشترک منیزیم-رو است و به جای ساختار لایه لایه ای و گردابی ساختار فصل مشترک به صورت انجمادی و یوتکتیکی است. همانگونه که در شکل 6 مشخص است ساختار فصل مشترک به صورت انجمادی و یوتکتیکی است.

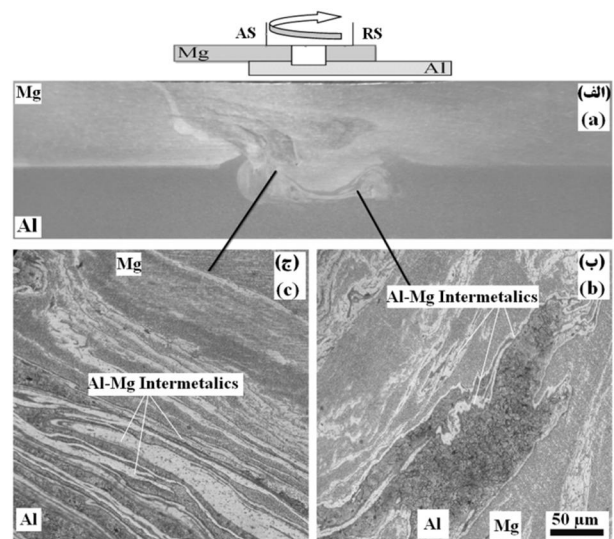


Figure 5 Microstructure of different zone from interface in Mg top-Retreading edge joints

شکل 5 تصاویر میکروسکوپ نوری از نواحی مختلف فصل مشترک اتصال منیزیم-رو و قراگیری لایه اتصال در سمت پسر و

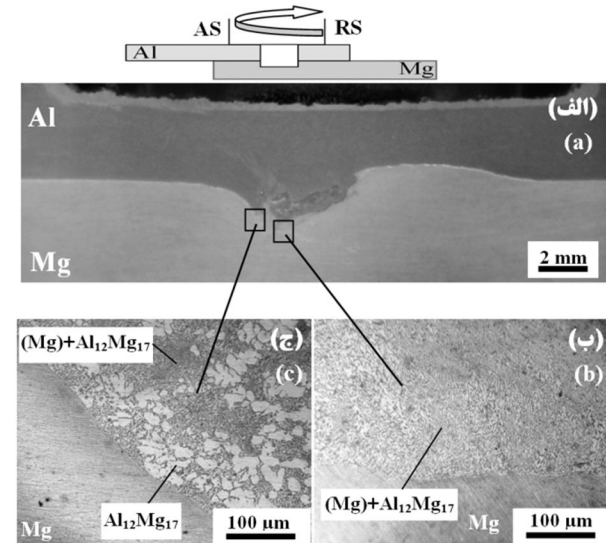


Fig. 6 Microstructure of different zone from interface in Mg top-Retreading edge joints

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ نوری از نواحی مختلف فصل مشترک اتصال آلومینیم-رو و قراگیری لایه اتصال در سمت پسر و

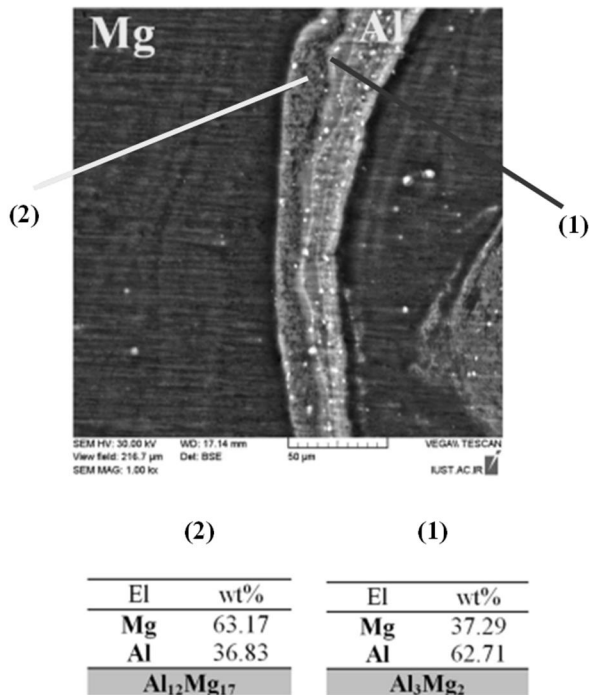


Fig. 7 EDS analysis results from diffusion layer in Magnesium-top joints

شکل 7 آنالیز EDS لایه نفوذی در اتصال منیزیم-رو

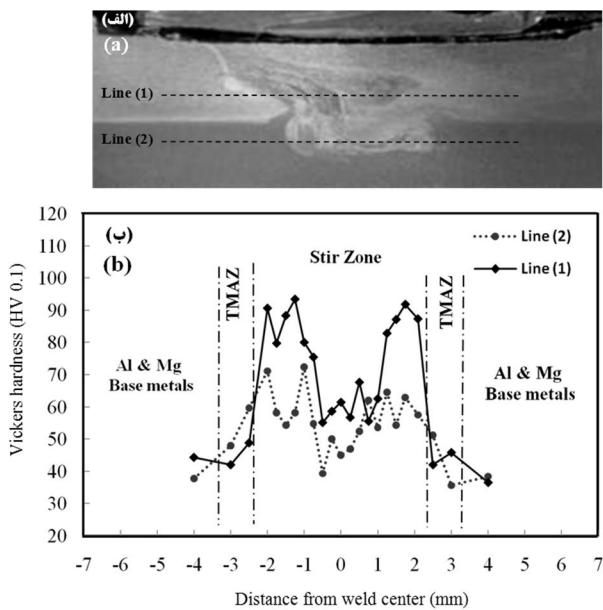


Fig. 9 (a) Macrostructure of the welded joint and the micro hardness tested lines of Mg-top retreading edge (b) micro hardness distribution on the (1) magnesium side and (2) aluminum side of the joints

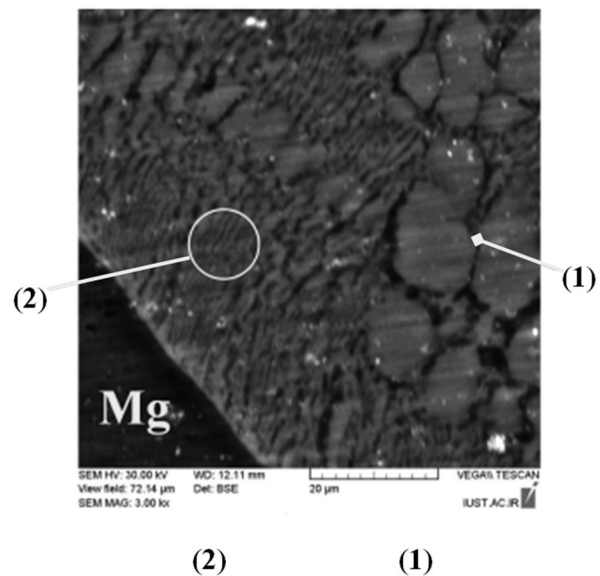
شکل 9 نمودارهای تغییرات سختی بر حسب فاصله از مرکز اتصال برای دو مسیر افقی در فاصله 1 میلیمتری از پایین و بالای اتصال منیزیم-رو و حالت پسرولبه

باعث تبلور مجدد دینامیکی و تشکیل دانه‌های ریز در کنار تشکیل ترکیبات بین فلزی می‌شود. ریزشدن دانه‌ها، باعث سختی بالاتر ناحیه تحت تاثیر مکانیکی-حرارتی¹ نیز می‌شود که در شکل 9 مشخص است [14،15].

در شکل 10 (ب) نمودارهای تغییرات سختی بر حسب فاصله از مرکز اتصال برای مسیر افقی در قسمت پایین اتصالات آلومینیم-رو و حالت پسرولبه (شکل 10 الف)) نشان داده شده است.

همانگونه که در شکل 10 مشخص است، سختی در ناحیه اختلاط، در مقایسه با فلز پایه منیزیم، بسیار بیشتر است که در اتصالات غیر مشابه به علت تشکیل ترکیبات بین فلزی، این حالت ایجاد می‌گردد [16]؛ به گونه ای که سختی فلز پایه منیزیم در محدوده 25 تا 30 ویکرز و سختی ناحیه اختلاط در محدوده 175 تا 200 ویکرز است. از طرف دیگر به علت تشکیل ناحیه انجمادی ضخیم با ساختار یوتکتیک (بر خلاف حالت لایه ای اتصالات منیزیم-رو)، تغییرات سختی در ناحیه اغتشاش (شکل 10 الف))، نوسان زیادی ندارد و مقادیر بالاتری نیز دارد و به 200 ویکرز می‌رسد. این ساختار به علت حضور فاز بسیار سخت $Al_{12}Mg_{17}$ ، سختی بالایی دارد. حجاری و همکاران [2] نیز سختی بالای فصل مشترک اتصال ریخته‌گری مرکب آلومینیم و منیزیم را به حضور ساختار انجمادی لایه $(Mg) + Al_{12}Mg_{17}$ مرتبط دانسته اند.

در شکل 11 تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک اتصال آلومینیم رو در حالت پسرولبه، پس از ریز سختی سنجی نشان داده شده است. همانطور که مشخص است در مسیر عمودی با عبور از ناحیه فصل مشترک با ساختار انجمادی، قطر اثر نقاط سختی سنجی به میزان قابل توجهی کاهش یافته است که نشان از سختی بالا در ناحیه انجمادی دارد. سختی بسیار بالای فصل مشترک با ساختار انجمادی می‌تواند باعث تردی



El	wt%	El	wt%
Mg	67.61	Mg	61.48
Al	32.39	Al	38.52
$(Mg) + Al_{12}Mg_{17}$		$Al_{12}Mg_{17}$	

Fig. 8 EDS analysis results from interface with solidified structure in Aluminum-top joints

شکل 8 آنالیز EDS ناحیه فصل مشترک با ساختار انجمادی در اتصال آلومینیم-رو

ایجاد مذاب در فرآیند جاه و نهایتاً تشکیل ساختار انجمادی می‌گردد. طبق تحقیقات انجام شده توسط محققین [9،12]، گزارش شده است که در حالت تماس ابزار با ورق آلومینیم در مقایسه با ورق منیزیم، حرارت بالاتری ایجاد می‌شود که ناشی از حرارت اصطکاکی بالاتر و حرارت بالاتر حاصل از انرژی کرنشی آزاد شده در آلومینیم است. این نتیجه، منطبق با نتایج تحقیق فیروزدر و کو [9] است.

3-3- سختی سنجی

در شکل 9 (ب)، نمودارهای تغییرات سختی بر حسب فاصله از مرکز اتصال، برای دو مسیر افقی در اتصال منیزیم-رو و حالت پسرولبه (شکل 9 الف)) نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است، تغییرات ریزسختی در ناحیه اختلاط به صورت نوسانی است.

فصل مشترک در اتصالات منیزیم-رو، به علت حضور لایه‌های در هم تنیده آلومینیم و منیزیم، ریزسختی نوسانی دارد. سختی در ناحیه لایه لایه ای مقادیری بین 30 تا 93 ویکرز دارد که به ترتیب مربوط به سختی فلزات پایه و ساختار لایه‌ای در ناحیه اختلاط است که در فصل مشترک آن ترکیبات بین فلزی آلومینیم-منیزیم ایجاد شده است. همانطور که مشخص است فلز پایه کمترین سختی را دارد و ناحیه اتصال، که شامل لایه‌های در هم پیچیده است به علت حضور ترکیبات بین فلزی، سختی افزایش یافته است و تغییرات نوسانی سختی در مرکز جوش، به علت ساختار لایه لایه ای این منطقه است [7].

از آنجایی که ماده در فرآیند جاه، تحت تغییر شکل بسیار زیاد و دماهای نسبتاً بالا قرار می‌گیرد، تغییرات ریزساختاری از قبیل تبلور مجدد قابل پیش بینی است. در منطقه اختلاط جوش، تغییر شکل زیاد با حرارت ایجاد شده،

1- Thermo-Mechanically Affected Zone= TMAZ

3-4- نتایج آزمون کشش-برش

نتایج آزمون کشش-برش نمونه‌های جوش داده شده با شرایط و پارامترهای فرآیند جوشکاری در شکل 12 آورده شده است.

نتایج بررسی استحکام اتصالات در آزمون کشش-برش نشان می‌دهد که اتصالات منیزیم-رو، استحکام شکست بالاتری نسبت به اتصالات آلومینیم-رو دارند. در اتصال منیزیم-رو در حالت لبه پسر، نیروی شکست برابر 2280 نیوتن و در حالت آلومینیم-رو نیروی شکست برابر 1640 نیوتن بدست آمده است.

علت استحکام بالاتر اتصالات منیزیم-رو مربوط به فصل مشترک اتصالات آن‌ها در مقایسه با اتصالات آلومینیم-رو می‌توان دانست. در اتصالات منیزیم-رو به علت حرارت ورودی کمتر، ذوب و انجمادی در فصل مشترک ایجاد نمی‌شود و ساختار فصل مشترک به صورت لایه‌های در هم تنیده است که نفوذ اتمی بین آن‌ها اتفاق افتاده است و اتصال مکانیکی-متالورژیکی ایجاد نموده اند (شکل 5). در صورتی که در اتصالات آلومینیم-رو، بواسطه تشکیل ساختار انجمادی با ضخامت در ابعاد میلیمتر (شکل 6) و با سختی بسیار بالا (شکل 10)، فصل مشترک بسیار ترد و شکننده بوده و استحکام اتصال را کاهش می‌دهد.

از طرف دیگر دیده می‌شود در حالتی که لبه ورق بالایی در سمت پسر است، استحکام اتصالات بالاتر است؛ به گونه‌ای که در حالت منیزیم-رو، وقتی لبه ورق بالایی (منیزیم) در سمت پسر است نیروی برشی 2280 نیوتن و در حالتی که در سمت پیشرو باشد نیروی برشی 1900 نیوتن بدست آمده است. کاهش ضخامت در ورق منیزیم در اثر نیروی فشاری حاصل از ابزار و بالاکشیده شدن سطح اتصال ورق آلومینیم و منیزیم و ایجاد عیب قلاب‌شدگی در کنار تمرکز تنش، دو عامل موثر بر شکست اتصال از ورق منیزیم بالایی و در سمت دور از لبه اتصال است (شکل 13 الف) و (ب)).

در شکل 14 مسیر توزیع تنش بر روی اتصال منیزیم-رو نشان داده شده است. علت شکست از سمت دور از لبه، توزیع نیرو و تمرکز تنش است. بررسی محل شکست اتصالات (شکل 13) نشان می‌دهد، اتصالات منیزیم-رو از فصل مشترک اتصال نمی‌شکنند بلکه از ورق منیزیم و از سمت دور از لبه می‌شکنند (شکل 13 الف) و (ب)). در حالی که در اتصالات آلومینیم-رو، شکست از فصل مشترک اتفاق می‌افتد (شکل 13 ج) و (د)) و در اتصالات آلومینیم-رو، فصل مشترک بسیار ضعیف و شکننده است.

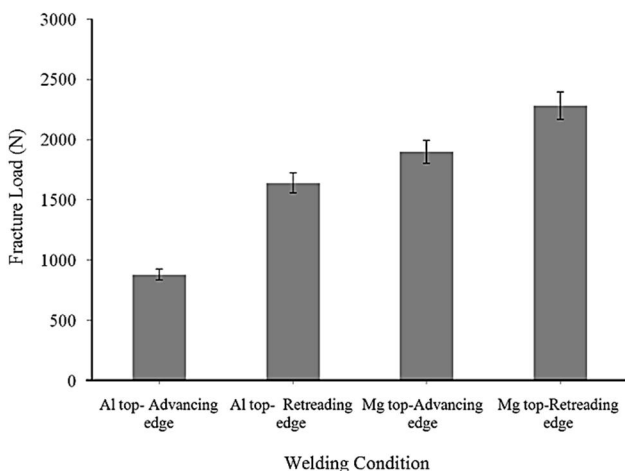


Fig. 12 Results of shear tensile tests of Al/Mg joints

شکل 12 نتایج آزمون کشش-برش اتصالات آلومینیم-منیزیم

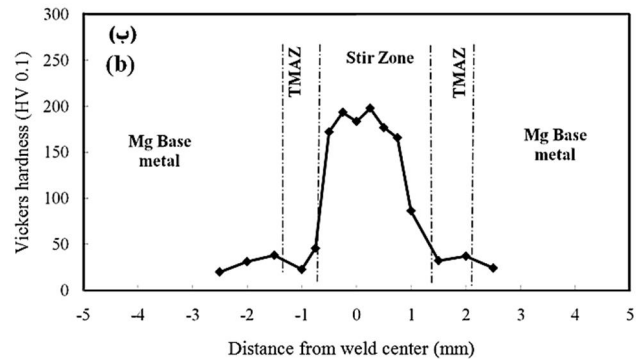
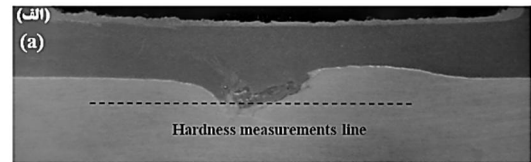


Fig. 10 (a) Macrostructure of the welded joint and the micro hardness tested lines of Al-top retreading edge (b) micro hardness distribution

شکل 10 نمودارهای تغییرات سختی بر حسب فاصله از مرکز اتصال برای مسیر افقی در فاصله 1 میلیمتری از پایین اتصال آلومینیم-رو و حالت پسر-لبه

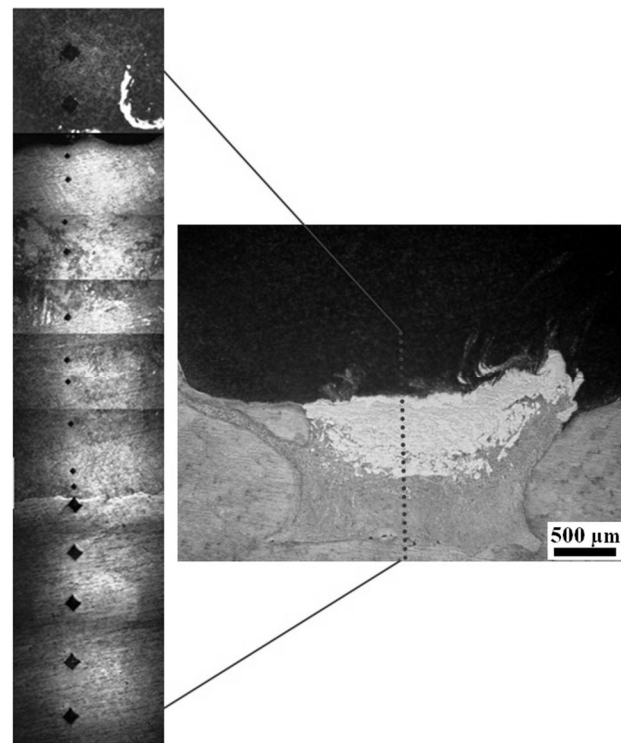


Fig. 11 Optical microscopy images of the intersection of Solidified structure and the vertical line of aluminum-top retreading side joints

شکل 11 تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک با ساختار انجمادی و محل اثر میکروسختی سنجی در خط عمودی در فصل مشترک در اتصال آلومینیم-رو در حالت پسر-لبه

این ناحیه گردد و در هنگام اعمال تنش‌های کششی، به عنوان منطقه جوانه زنی و رشد ترک عمل نماید. در این تحقیق رفتار این فصل مشترک در اثر بارگذاری کششی مورد بررسی قرار گرفته است.

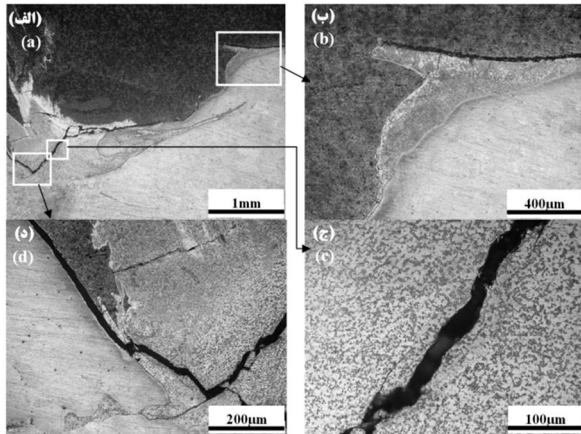


Fig. 15 Optical microscope images from the interface of aluminum top joint loaded to 500 Nm

شکل 15 تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک نمونه آلومینوم رو و حالت پسرو-لبه بارگذاری شده تا 500 نیوتن

پس از اتمام جوشکاری در فصل مشترک ایجاد می‌گردد که شکست در آزمون کشش را تسریع می‌نماید [17].

3-6- بررسی سطح شکست اتصالات

بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل 16) از سطح شکست منیزیم در اتصالات منیزیم-رو، نشان می‌دهد سطح شکست حاوی دیمپل‌ها و فرورفتگی‌هایی است که می‌تواند نشان دهنده شکست نرم در فلز منیزیم باشد. شکل 16 (الف) و (ب) ترکیب شیمیایی دو نقطه از سطح شکست را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است آنالیز نقطه‌ای قسمت نزدیک دیمپل (الف)، ترکیب شیمیایی غنی از منیزیم را مشخص می‌کند و نقطه (ب) در قسمت ترک ایجاد شده، ترکیب شیمیایی حاوی 52.92 درصد منیزیم است که به ترکیب شیمیایی Al_3Mg_2 نزدیک است. این نشان می‌دهد در اتصالات منیزیم-رو، شکست از داخل منیزیم و در امتداد لایه‌های ترکیبات بین فلزی ایجاد می‌گردد و این مسیر مناسبی برای رشد ترک و شکست است. این قسمت شکست ترد همان فصل مشترک لایه‌های کشیده شده از آلومینیم در ورق منیزیم است (شکل 5 ج)).

در شکل 17 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه ای از سطح شکست در اتصال آلومینیم-رو و پسرو-لبه نشان داده شده است که آنالیز نقطه‌ای تفکیک انرژی سطح شکست ترد آن، نشان دهنده حضور فاز Al_3Mg_2 بر روی سطح شکست است و سطح شکست بر خلاف اتصال منیزیم-رو نشانه‌هایی از حضور دیمپل‌ها ندارد که شکست کاملاً ترد را نشان می‌دهد.

در شکل 18 طرح پراش اشعه X از سطح مقطع اتصال منیزیم-رو و حالت پسرو-لبه آورده شده است. بررسی فازهای ایجاد شده در فصل مشترک اتصالات توسط طرح پراش اشعه X، نشان دهنده حضور ترکیب بین فلزی $Al_{12}Mg_{17}$ و Al_3Mg_2 در ناحیه اختلاط است.

4- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر موقعیت قرارگیری ورق‌های آلومینیم و منیزیم و همچنین جهت چرخش ابزار بر خواص اتصال لبه رو هم آلومینیم و منیزیم ایجاد شده به روش جوشکاری اصطکاکی همزنی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج زیر حاصل شده است:

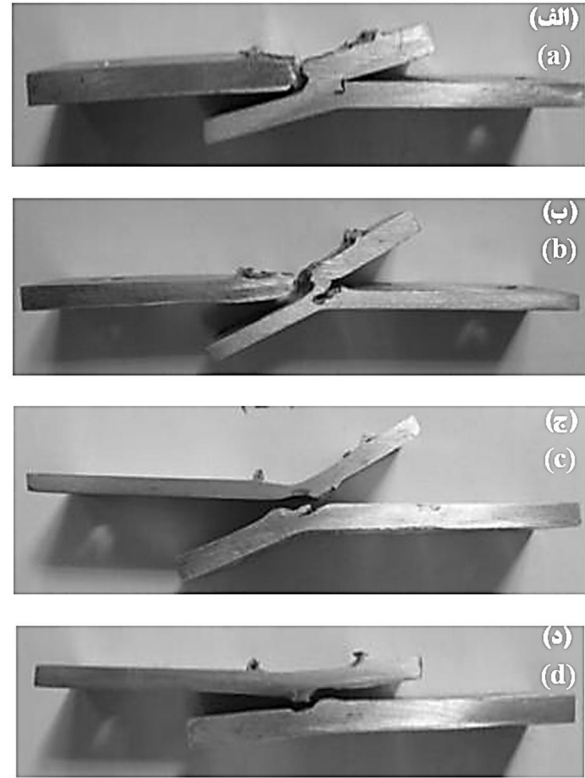


Fig. 13 Images of failed samples after shear tensile test in joints of (a) Mg top-Retreading edge (b) Mg top-Advancing edge (c) Al top-Retreading edge (d) Al top-Advancing edge

شکل 13 تصاویر نمونه‌های پس از آزمون کشش-برش (الف) منیزیم-رو - پسرو-لبه، (ب) منیزیم-رو-پیشرو-لبه، (ج) آلومینیم-رو- پسرو-لبه (د) آلومینیم-رو-پیشرو-لبه

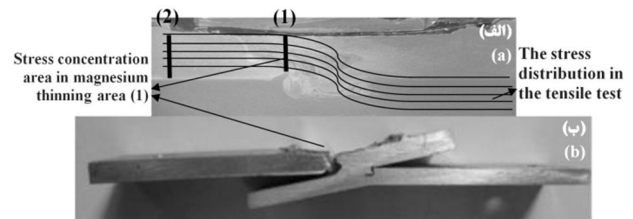


Fig. 14 The distribution stress in magnesium in Mg top-Retreading edge joint

شکل 14 مسیر توزیع تنش بر روی اتصال منیزیم رو در حالت پسرو-لبه

همانطور که مشخص است در ناحیه مشخص شده (1) در شکل 14 (الف) به دلیل کاهش سطح مقطع در مقایسه با محل (2)، تمرکز تنش در آزمون کشش ایجاد می‌شود که از همین ناحیه شکست در اتصالات منیزیم رو اتفاق می‌افتد.

3-5- نتایج بارگذاری تا 500 نیوتن برای بررسی مسیر رشد ترک

در شکل 15 تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک نمونه آلومینوم رو و حالت پسرو-لبه و بارگذاری شده تا 500 نیوتن، نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، در اثر بارگذاری کششی، ترک در فصل مشترک آلومینیم و لایه واکنشی ایجاد شده، رشد می‌نماید [17] و از طرف دیگر درون لایه ترکیب بین فلزی ترد نیز ترک‌های متعدد ایجاد شده است.

ترک اولیه از محل ترکیبات بین فلزی جوانه زنی کرده و رشد می‌نماید. البته لازم به ذکر است که ترک‌های اولیه‌ای نیز در لایه‌های ترکیبات بین فلزی

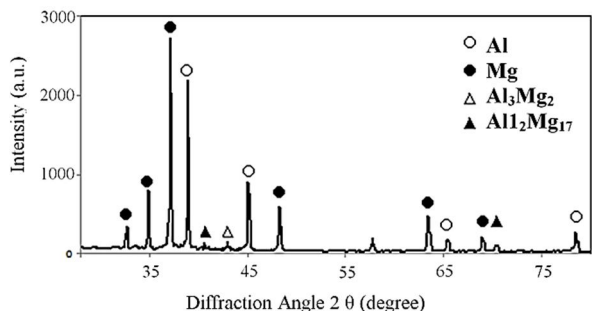


Fig. 18 XRD patterns of the in magnesium-top Retreading edge joint

شکل 18 طرح پراش اشعه X از سطح مقطع اتصال منیزیم رو و پسرو لبه

1- قرارگیری منیزیم به عنوان ورق بالایی، باعث ایجاد جوش‌های با استحکام بالاتر می‌گردد به گونه‌ای که استحکام اتصال به صورت تقریبی دو برابر می‌گردد.

2- در صورتی که لبه ورق بالایی در سمت پسرو باشد، استحکام اتصال افزایش می‌یابد و این افزایش در مورد حالت آلومینیم-رو شدیدتر است.

3- اتصالات منیزیم-رو از درون منیزیم و در سمت دور از لبه اتصال می‌شکند در حالی که اتصالات آلومینیم-رو از فصل مشترک اتصالات و به صورت کاملا ترد و در امتداد لایه ضخیم انجمادی در فصل مشترک می‌شکند.

4- در فصل مشترک اتصال منیزیم-رو، لایه‌های آلومینیم و منیزیم مخلوط شده در یکدیگر در حالت جامد نفوذ می‌کنند و از سمت آلومینیم به منیزیم به ترتیب دو لایه نفوذی Al_3Mg_2 و $Al_{12}Mg_{17}$ را تشکیل می‌دهند.

5- ناحیه اختلاط در فصل مشترک اتصال آلومینیم-رو، از ساختار انجمادی یوتکتیک $(Mg) + Al_{12}Mg_{17}$ تشکیل شده است که نشان دهنده مکانیزم نفوذ ابتدایی و تشکیل مذاب یوتکتیک در فرآیند جوشکاری اصطکاکی آلومینیم رو است.

5- تقدیر و تشکر

نویسندگان از متصدیان کارگاه ماشین ابزار، آزمایشگاه متالوگرافی، بخش SEM دانشگاه علم و صنعت ایران، جهت کمک در انجام آزمایش‌های تجربی و آنالیز نمونه‌ها، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

6-مراجع

[1] M. A. Mofid, A. Abdollah-zadeh, F. Malek Ghaini, The effect of water cooling during dissimilar friction stir welding of Al alloy to Mg alloy, *Materials and Design*, Vol 36, pp. 161-167, 2012.

[2] E. Hajjari, M. Divandari, SH. Razavi, SM. Emami, T. Homma, S. Kamado, Dissimilar joining of Al/Mg light metals by compound casting process, *Journal of materials science*, Vol. 46, No. 11, pp. 6491-6499, 2011.

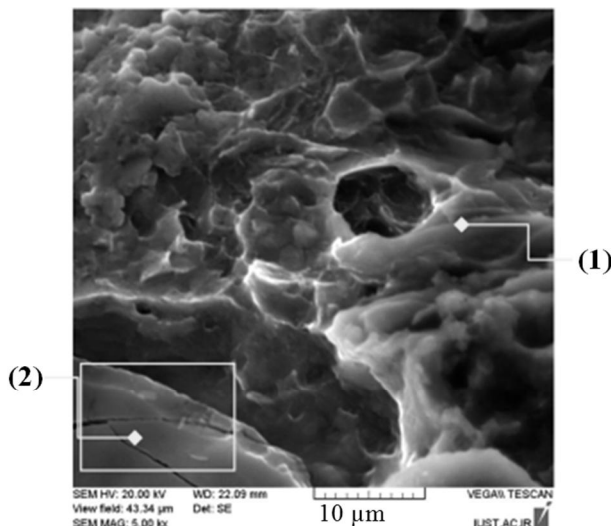
[3] E. Hajjar, M. Divandari, SH. Razavi, T. Homma, S. Kamado, Intermetallic compounds and antiphase domains in the Al / Mg casting compound, *Intermetallics*, pp 1-5, 2011.

[4] E. Hajjari, M. Divandari, S. H. Razavi, T. Homma, S. Kamado, Microstructure characteristics and mechanical properties of Al 413/Mg joint in compound casting process, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 43, pp. 4667-4677, 2012.

[5] F. Liu, Z. Zhang, L. Liu, Microstructure evolution of Al/Mg butt joints welded by gas tungsten arc with Zn filler metal, *Materials Characterization*, Vol 69, pp. 84-89, 2012.

[6] A. A. McLean, G.L.F. Powell, I.H. Brown, and V.M. Linton, "Friction stir welding of magnesium alloy AZ31B to aluminium alloy 5083", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 8, No. 6, pp. 462-464, 2003

[7] P. Venkateswaran, A.P. Reynolds, Factors affecting the properties of Friction Stir Welds between aluminum and magnesium alloys,



El	Wt%
Mg	52.92
Al	47.08

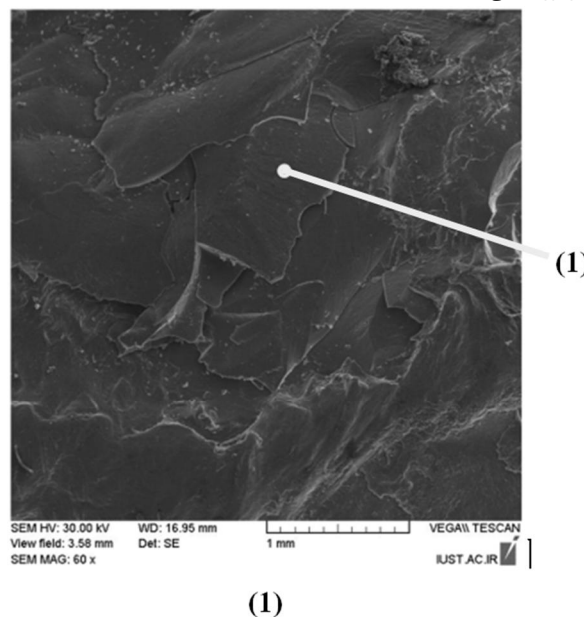
Al/Mg Intermetallics

El	Wt%
Mg	93.38
Al	4.53
O	2.09

Mg

Fig. 16 SEM image of the fracture surface of magnesium in magnesium-top at high magnification

شکل 16 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست منیزیم در اتصالات منیزیم-رو در بزرگنمایی بالا



El	wt%
Mg	31.70
Al	68.30

Al_3Mg_2

Fig. 17 Scanning electron microscope image of the region of the fracture surface of the aluminum-top which failed from interface

شکل 17 تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی از ناحیه‌ای از سطح شکست در اتصال آلومینیم-رو و پسرو-لبه که از فصل مشترک شکسته است.

- interface during friction stir spot welding, *Intermetallics*, Vol. 19, No. 2, pp. 125-130, 2011
- [14] M. Elyasi, H. Aghajani Derazkola, M. Hoseinzadeh, Study on joint zone microstructure evolution and hardness in friction stir welding of AA1100 aluminum alloy to A441 AISI steel, *Modares mechanical engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 97-107, 2015 (in Persian فارسی)
- [15] A. Azizi, M. E. Aalami Aleagha, H. Moradi, Investigation of thermal, mechanical and microstructural properties of 7000 series Aluminum alloys welding using friction stir welding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 148-154, 2015 (in Persian فارسی)
- [16] M. Elyasi, H. Aghajani Derazkola, M. Hosseinzadeh, Effects of friction stir welding parameters on mechanical quality of AA1100 aluminum alloy to A441 AISI steel joint, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 379-390, 2015 (in Persian فارسی)
- [17] S. Hassanifard, A. Parghazeh, Fatigue lifetime and crack path prediction in four-point bending test of friction stir Cu-7075-T6 Aluminum alloy welded joints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 193-198, 2014 (in Persian فارسی)
- Materials Science and Engineering A*, Vol 545, pp. 26-37, 2012.
- [8] A. Kostka, R. S. Coelho, J. dos Santos, A. R. Pyzalla, Microstructure of friction stir welding of aluminum alloy to magnesium, *Scripta Materialia*, Vol. 60, pp. 953-956, 2009
- [9] V. Firouzdor, S. Kou, Al to Mg friction stir welding: effect of material position travel speed and rotation speed, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol 4, pp. 2914-2935, 2010.
- [10] R. Zettler, A. A. M. da Silva, S. Rodrigues, A. Blanco, J. F. dos Santos, Dissimilar Al to Mg alloy friction stir welds, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 8, No. 5, 415-421, 2006
- [11] J. ch. Yan, Zh. W. Xu, Zh. y. Li, L. Lei, Yang Shi-qin, Microstructure characteristics and performance of dissimilar welds between magnesium alloy and aluminum formed by friction stirring, *Scripta Mater*, Vol. 53, No. 5, pp. 585-589, 2005
- [12] Y. C. Chen, K. Nakata, Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys, *Scripta Materialia*, Vol. 58, No. 6, pp. 433-436, 2008
- [13] D. H. Choi, B. W. Ahn, C. Y. Lee, Y. M. Yeon, K. Song, S. B. Jung, Formation of intermetallic compounds in Al and Mg alloy