

Intermetallic compound formation at the Interface of Diffusion Bond and Friction Stir Weld of Al/Mg joints

***Mohammad Ammar Mofid¹, Hamid Naeimian²**

1- Assistant Professor, Department of Petroleum, Mining and Material Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- MSc. Student, Department of Petroleum, Mining and Material Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Citation: Mofid M.A, Naeimian H. Intermetallic compound formation at the Interface of Diffusion Bond and Friction Stir Weld of Al/Mg joints. Metallurgical Engineering 2019; 22 (2): 135-143 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.107087.1244>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.107087.1244>

ABSTRACT

Dissimilar joining of Al5083 to MgAZ31 was performed through friction stir welding (FSW) and diffusion bonding (DB). A constant tool rotation rate of 400 rpm and travel speed of 50 mm/min was used for FSW. The peak temperature of this specimen was raised to maximum of 435°C at the advancing side of the FS weld. Thermal cycle of the FSW specimen showed a distinct plateau at about 430 °C, lasting for about 8 s. At the travel speed of 50 mm/min, the distance corresponding to 8 s is about 7mm, which is the pin diameter. The presence of the temperature plateau indicates that the temperature at each thermocouple remained constant as the pin passed it. It further indicates that a eutectic reaction probably occurred, and kept the temperature constant as the pin passed by. The weld had an irregular shaped region in the weld center of DB weld and, having a different microstructure and hardness from the two base materials. The irregular shaped region in DB weld, contained a large volume of intermetallic compound $Al_{12}Mg_{17}$. The present study suggests that constitutional liquation and solid state diffusion at the interface resulted in the intermetallic compound formation in the weld center.

Keywords: Friction stir weld, Diffusion bond, Temperature profile, Mg alloy, Interface microstructure.

Received: 29 April 2019 | Accepted: 4 November 2019

■.....■

* **Corresponding Author:**

Mohammad Ammar Mofid, PhD

Address: Department of Petroleum, Mining and Material Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Tel: +98 (9124220622)

E-mail: moh.ammar_mofid@iauctb.ac.ir

تشکیل ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک جوش نفوذی و جوش همزن اصطکاکی اتصال Al/Mg

*محمدعمار مفید^۱، حمید نعیمیان^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی نفت معدن و مواد دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

چکیده

اتصال آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ و آلیاژ منیزیم AZ ۳۱ به دو روش جوشکاری نفوذی و جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW) انجام شد. برای نمونه FSW از سرعت چرخش ۴۰۰ rpm و سرعت حرکت خطی ۵۰ mm/min استفاده شد. دمای اندازه گیری شده در این نمونه تا بیشینه ۴۳۵ °C در اطراف سمت پیشرونده ابزار افزایش یافت. چرخه دمایی نمونه FSW نشانگر یک ترازشدگی در دمای حدود ۴۳۰ °C بود که در حدود ۸ ثانیه ادامه دارد. وجود این ترازشدگی دمایی، مبین آن است که با عبور پین از روی هر دماسنج، دما در آن دماسنج، ثابت باقی می ماند. این موضوع می تواند مبین آن باشد که احتمالاً یک واکنش یوتکتیک اتفاق افتاده و همین موضوع سبب ثابت ماندن دما در لحظه عبور پین از روی دماسنج شده است. جوشکاری نفوذی در بیشینه دمایی که در هنگام FSW تجربه می شود (۴۳۵ °C) و مدت زمان اتصال دهی ۶۰ دقیقه انجام شد. جوش دارای یک شکل نامتعارف در مرکز جوش اتصال نفوذی بود که سختی متفاوتی نسبت به دو فلز پایه از خود نشان داد. ناحیه دارای شکل نامتعارف در جوش نفوذی و فصل مشترک Al و Mg در جوش همزن اصطکاکی، هردو حاوی حجم زیادی از ترکیبات بین فلزی $Al_{12}Mg_{17}$ بوده و سختی کاملاً بالاتری در مرکز جوش از خود نشان دادند. در تحقیق حاضر این نظریه مطرح شده که ذوب قانونمند و نفوذ در حالت جامد در فصل مشترک، باعث تشکیل ترکیب بین فلزی $Al_{12}Mg_{17}$ به ترتیب در مرکز جوش نفوذی و جوش همزن اصطکاکی شده است و همین امر باعث افزایش سختی در ناحیه جوش گشته است.

واژه های کلیدی: اتصال نفوذی، جوش همزن اصطکاکی، پروفیل دمایی، آلیاژ منیزیم، ریزساختار فصل مشترک.

دریافت: ۱۳۹۸/۲/۹ | پذیرش: ۱۳۹۸/۸/۱۳

۱. مقدمه

اصطکاکی، جوشکاری انفجاری، جوشکاری فاز مایع گذرا^۱ و جوشکاری نفوذی^۲ [۵-۷]. در روش جوشکاری همزن اصطکاکی^۳ [۸-۱۲] Al-Mg می توان به استحکام اتصال نسبتاً بالایی در مقایسه با سایر روش ها دست یافت اما به دلیل تماس مستقیمی که بین دو فلز پایه Al و Mg اتفاق می افتد، ترکیبات بین فلزی زیادی نیز در اتصال ایجاد می گردند.

همانطور که گفته شد FSW به این منظور به کار گرفته شد که لایه واکنشی بین فلزی را حذف نماید، اما با این روش تنها میتوان IMC ها را کاهش داد. دو راهبرد برای کاهش IMC ها وجود دارد. اولین رهیافتی که در تحقیق قبلی توسط همین محققین به کار گرفته شد، انجام FSW غوطه ور (SFSW)^۴

ترکیب Al و Mg در یک سازه هیبریدی، امکان استفاده از این آلیاژها را در کاربردهای بسیار گسترده تری فراهم نموده و باعث صرفه جویی در وزن که امری مطلوب به شمار می آید خواهد شد. با توجه به استفاده فزاینده از آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم در صنایع هوافضا، خودرو، الکترونیک و شیمیایی، اتصال دهی این دو آلیاژ به یکدیگر اجتناب ناپذیر خواهد بود. در این راستا از روش های اتصال دهی ذوبی و روش های جامد، برای اتصال این دو آلیاژ استفاده شده است. نظر به مشکلات متعدد جوشکاری ذوبی این آلیاژها، نظیر ایجاد ترک های حرارتی، ناخالصی های اکسیدی و تشکیل ترکیبات ترد بین فلزی، توجه زیادی به اتصال این دو آلیاژ از طریق روش های حالت جامد معطوف شده است [۱-۴].

فرآیندهای حالت جامد - جامدی که برای اتصال این دو آلیاژ مورد استفاده قرار گرفته اند، عبارتند از: روش های جوشکاری

1. Transient Liquid Phase
2. Diffusion Bonding
3. Friction Stir Welding
4. Intermetallic Compound
5. Submerged FSW

* نویسنده مسئول:

دکتر محمدعمار مفید

نشانی: تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی نفت معدن و مواد.

تلفن: (۹۱۲۴۲۲۰۶۲۲) ۹۸+

پست الکترونیکی: moh.ammar_mofid@iauctb.ac.ir

مورد جوشکاری همزن اصطکاکی قرار دادند [۲۲]. آنها نیز تشکیل ترکیبات ترد بین‌فلزی در ناحیه همزده را تایید نمودند. اما در هیچ منبعی به مقایسه جزئیات تغییرات ریزساختاری در حین FSW غیرهمجنس و جوشکاری نفوذی Al و Mg پرداخته نشده است.

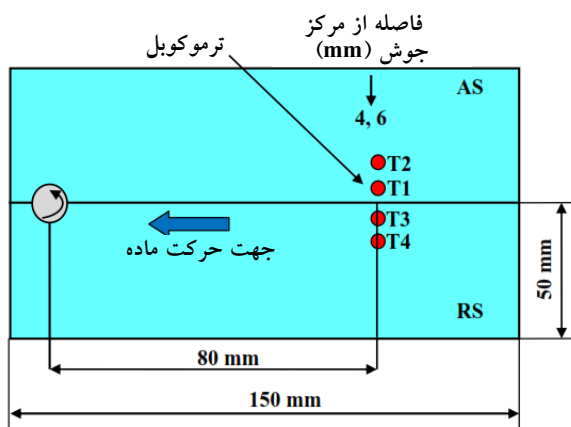
در تحقیق حاضر مشخصه‌های ریزساختاری در جوشکاری آلیاژهای غیرهمجنس Al5083 و MgAZ31 به دو روش همزن اصطکاکی و نفوذی مورد مطالعه قرار گرفته است. جوشکاری نفوذی در بیشینه دمایی که در هنگام FSW تجربه می‌شود انجام شده است. در این تحقیق تغییرات ریزساختاری در حین این دو فرآیند مورد بحث قرار گرفته است.

۲. مواد و روش تحقیق

مواد پایه مورد استفاده در این تحقیق عبارت بودند از ورق‌های با ضخامت ۳ mm از آلیاژ ۵۰۸۳ Al با ترکیب ۰/۶ Mn - ۰/۱ C - ۰/۳ Fe - ۰/۲ Si - ۴/۶ Mg - Al (درصد وزنی) و آلیاژ ۳۱ C - O Mg AZ با ترکیب ۰/۲ Mn - ۳/۱ Zn - Al - ۵/۳ Mg (درصد وزنی). برای FSW، پین در حال چرخش در امتداد خط لب به لب بین دو فلز پایه حرکت داده شد. ابعاد قطعه کار، به صورت طرحواره در شکل ۱ نشان داده شده است. دو ورق، تحت سرعت چرخش ابزار ۴۰۰ rpm (سرعت چرخشی پایین، جهت ممانعت از ایجاد ترک) و سرعت حرکت خطی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه مورد جوشکاری FSW قرار گرفتند. مسیر حرکت ابزار در وسط درز اتصال بوده و جهت چرخش ابزار جوشکاری از نمای بالا، به صورت پادساعتگرد بوده و با شیب ۳ درجه نسبت به جلو انجام پذیرفت. قطر شانه ابزار ۲۰ میلی‌متر و به صورت مقعر بوده است. پین به صورت رزوه دار، با قطر ۷ میلی‌متر و ارتفاع پین ۲/۸ میلی‌متر بوده است. جنس ابزار فولاد H13 بوده است. اندازه‌گیری دما با استفاده از چهار دماسنج از نوع K انجام شد که در داخل قطعه

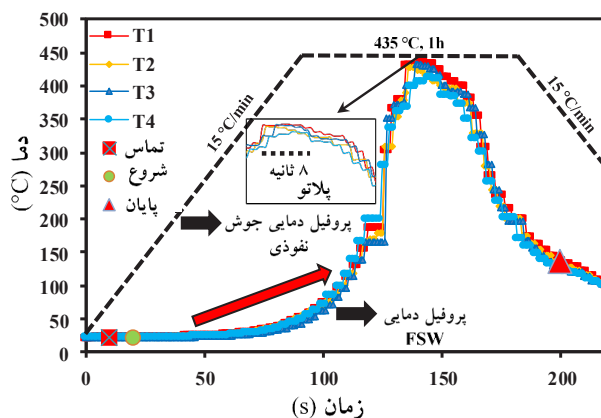
در زیر آب یا در زیر نیتروژن مایع است [۱۳]. رهیافت دیگر انجام جوشکاری نفوذی می‌باشد. جوشکاری نفوذی یک فرایند جوشکاری حالت جامد است که بر روی مواد همجنس و غیرهمجنس قابل اعمال می‌باشد.

سازوکارهای تشکیل مذاب و ترکیبات بین‌فلزی در حین جوشکاری همزن اصطکاکی توسط بعضی محققین مورد مطالعه قرار گرفته و رفتار دمایی در حین FSW، اندازه‌گیری شده است. فیروزدور و همکارانش [۱] این موضوع را تایید می‌کنند که دمای بیشینه در حین FSW، اندکی پایین‌تر از دمای واکنش یوتکتیک است، زیرا در هنگام جوشکاری (FSW)، دماسنج‌ها به سمت پایین متمایل می‌گردند. آنها همچنین وجود قطرات منجمد شده‌ای را که در دمای ۴۳۶ و ۴۴۹°C ذوب شده بودند از طریق گرماسنجی روبشی تفاضلی^۶ تایید نمودند. این دماها تقریباً معادل دمای یوتکتیک هستند. مطالعات تجربی و عملیاتی زیادی در مورد اتصال‌دهی نفوذی انجام شده است [۴ و ۵ و ۱۴ و ۱۵]. متغیرهای فرایندی مهم حاکم بر فرایند جوشکاری نفوذی عبارتند از: دمای اتصال‌دهی، فشار اتصال‌دهی و زمان نگهداری. مشخص شده که دمای اتصال‌دهی تاثیر بیشتر و مهم‌تری بر استحکام برشی و استحکام چسبندگی این اتصالات دارد و پس از آن فشار اتصال‌دهی، زمان نگهداری و زبری سطح، به ترتیب حائز اهمیت می‌باشند [۱۴]. بدیهی است که تحت متغیرهای گوناگون، ریزساختارهای متفاوتی تشکیل خواهد شد. با این حال، نتایج نشان داده‌اند که حضور ترکیبات بین‌فلزی، حتی در هنگامی که متغیرهای فرایندی بهینه‌سازی شده باشند نیز اجتناب‌ناپذیر است [۴ و ۱۵]. مروری بر منابع موجود مبین آن است که روش‌های FSW و جوشکاری نفوذی، دو روش مناسب برای اتصال‌دهی آلیاژهای غیر همجنس Al و Mg به شمار می‌آیند [۱۶-۲۰]. جوزف فرناندوس و همکارانش نمودارهای دما-زمان و فشار-زمان را برای انتخاب متغیرهای مناسب برای اتصال‌دهی نفوذی آلیاژهای Mg AZ۸۰ و Al۶۰۶۱ رسم نمودند [۱۴]. سوماسخواران و مور نشان دادند در جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژهای منبزم به Al۶۰۶۱، تشکیل ترکیبات ترد بین‌فلزی باعث افت خواص مکانیکی جوش می‌گردد [۲۱]. ساتو و همکارانش جوشکاری ورق‌های با ضخامت ۶ mm از جنس Al1050 به Mg AZ31 را در شرایط جوشکاری ۹۰ mm/min و ۲۴۵۰ rpm انجام دادند [۱۱]. نتایج کار این محققین نشانگر تشکیل حجم زیادی از ترکیبات بین‌فلزی و ایجاد ریزساختاری ناشی از انجماد یوتکتیک بود که سختی آن از فلزات پایه بالاتر می‌باشد. به دلیل تشکیل این ترکیبات بین‌فلزی، ترک‌هایی در ناحیه همزده جوش در تحقیق این محققین مشاهده شد. مک لین و همکارانش نیز ورق‌های ۱۲ mm از جنس Al 5083 به Mg AZ31 را تحت شرایط ۶۰ mm/min تا ۱۰۰ mm/min و ۳۰۰-۴۰۰ rpm



شکل ۱. طرحواره ای از ابعاد قطعه کار و موقعیت دماسنج‌ها، مورد استفاده جهت FSW.

6. Differential Scanning Calorimetry



شکل ۲. پروفیل‌های دمایی جهت فرآیند FSW با متغیرهای سرعت چرخش ابزار ۴۰۰ rpm و سرعت حرکت خطی ۵۰ mm/min و جوش نفوذی با متغیر دمای اتصال دهی ۴۳۵ °C به مدت ۶۰ دقیقه.

فازهای ثانویه در مناطق جوش به وسیله SEM مجهز به سیستم تجزیه و تحلیل EDS مورد مطالعه قرار گرفت. علاوه بر این، فازهای ثانویه موجود در ناحیه همزده FSW و ناحیه فصل مشترک جوش نفوذی به روش پراش پرتو ایکس (XRD) مورد شناسایی قرار گرفتند. نمونه‌های XRD با پودر کردن قطعاتی از ناحیه همزده نمونه FSW و ناحیه فصل مشترک جوش نفوذی که بیشتر حاوی فازهای ثانویه بودند، آماده سازی شدند. با این حال، این نمونه‌ها عملاً حاوی حجم اندکی از دو فلز پایه نیز بودند.

جهت به دست آوردن مقادیر ریزسختی ویکرز در امتداد مناطق جوش، از آزمایش سختی قابل حمل از طریق امپدانس تماسی فراصوتی^۷ (ASTM A1038) استفاده گردید [۲۳]. اندازه‌گیری‌ها در خطی به طول ۲ سانتیمتر از سطح مقطع (از سمت یک فلز پایه به سمت ناحیه انتقالی و امتداد آن به سمت فلز پایه دیگر) و با استفاده از بار ۱۰ N انجام شدند.

۳. نتایج و بحث

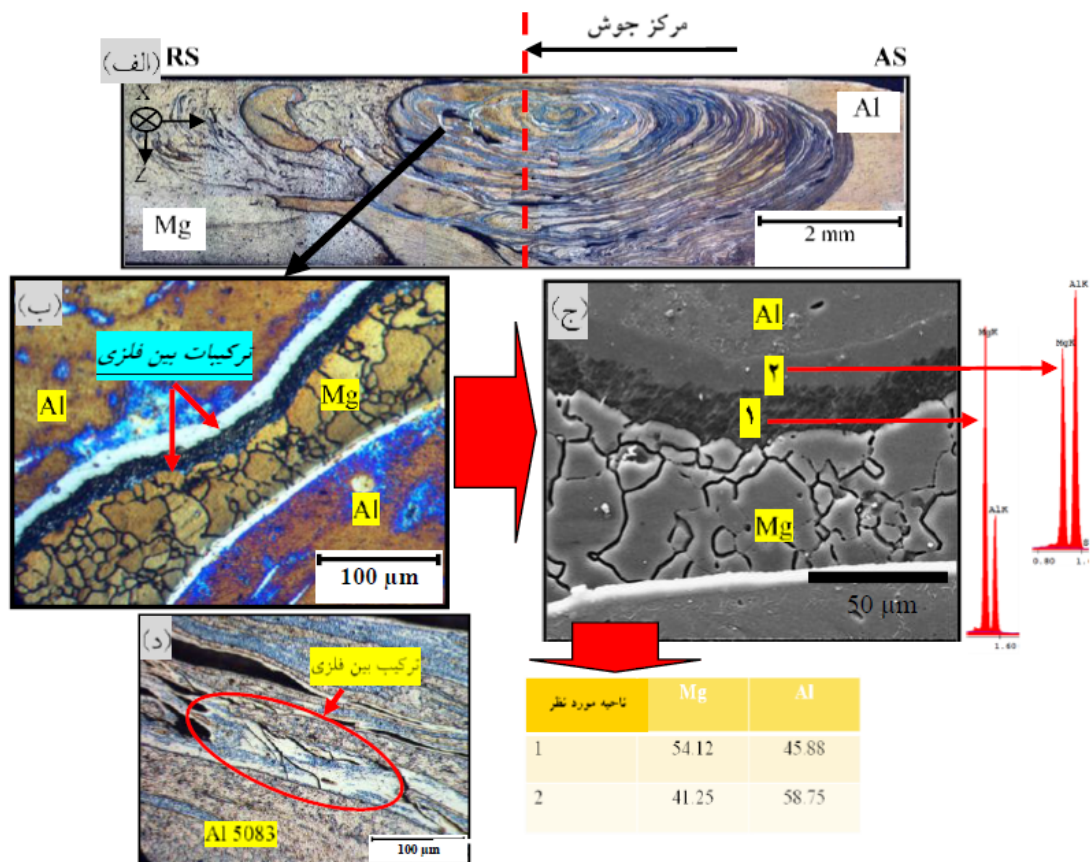
پروفیل‌های دمایی مربوط به نمونه‌های جوش همزن اصطکاکی و جوش نفوذی در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. پروفیل‌های شکل ۲ نشان دهنده آن هستند که هم جوش همزن اصطکاکی و هم جوش نفوذی در ۲۵ °C آغاز شده‌اند. ابزار چرخنده در نقطه‌ای که بر روی شکل ۲ با واژه «تماس» نشان داده شده، کار همزده نمونه FSW را آغاز نموده است. تقریباً ۱۰ ثانیه بعد، جوشکاری آغاز شده است. واضح است که بعد از شروع فرآیند جوشکاری، افزایش در دمای خوانده شده توسط دماسنج‌ها مشاهده می‌شود (فلش قرمز). با عبور پین در حال چرخش، از روی دماسنج‌ها، دما در این نقطه از نمونه، تا بیشینه ۴۳۵ °C در سمت پیشرونده جوش افزایش پیدا می‌کند.

نصب شده بودند. موقعیت دماسنج‌ها نسبت به قطعه کار در شکل ۱ نشان داده شده است. چهار دماسنج از نوع K، دارای غلاف از جنس فولاد زنگ نزن، با قطر خارجی ۱ میلی‌متر، در شیرهای مربعی به قطر ۱ میلی‌متر که در کف قطعه کار تعبیه شده بودند، جاسازی شدند. از یک سیستم جمع‌آوری داده‌های کامپیوتری با فرکانس ۱ هرتز جهت پایش دما در حین فرآیند FSW استفاده گردید. قبل از شروع هر جوش، ابزار به مدت ۱۰ ثانیه در تماس با ورق‌ها نگه داشته شد و پس از آن جوشکاری آغاز گردید. نمونه‌های متالوگرافی در جهت عمود بر جوشکاری برش داده شدند.

برای جوشکاری نفوذی، نمونه‌های مربعی شکل (۱۰×۱۰ میلی‌متر) از ورق‌های با ضخامت ۳ میلی‌متر از جنس آلیاژهای منیزیم (AZ31-O) و آلومینیوم (Al 5083) ماشینکاری شدند. سطوح نمونه‌ها از طریق روش معمول سمباده زنی با درجه زبری نهایی شماره ۱۲۰۰ سمباده زنی شدند. نمونه‌ها به صورت فراصوتی در یک حمام استون شستشو داده شدند تا هرگونه آلودگی چسبیده به سطح زدوده گردد. در ادامه، نمونه‌ها در محیط اتمسفر خشک گردیدند. جوشکاری نفوذی تحت فشار اتصال‌دهی ثابت ۱ مگاپاسکال و دمای اتصال‌دهی ۴۳۵ °C درجه به مدت زمان ۶۰ دقیقه انجام گردید. فشار خلا در کمتر از 10^{-3} ×۶ نگه داشته شد. در فرآیند اتصال‌دهی نفوذی، نرخ گرمایش در ۱۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه ثابت نگه داشته شده و کل تشکیلات در محفظه فرایند، که تحت خلا قرارداشت خنک گردید. مقطع زنی نمونه‌های جوشکاری نفوذی، با استفاده یک دستگاه برش زنی انجام گردید.

بعد از انجام جوشکاری همزن اصطکاکی و نفوذی، سطح مقطع‌های دو نمونه توسط میکروسکوپ نوری (OM) مورد بررسی قرار گرفت. جهت میکروسکوپی نوری، نمونه‌ها در محلولی شامل ۵ میلی لیتر اسیداستیک + ۵ گرم اسید پیکریک + ۱۰ میلی لیتر آب + ۱۰۰ میلی لیتر اتانول، حکاکی شدند تا سمت Mg جوش هویدا گردد. ترکیب شیمیایی

7. Ultrasonic Contact Impedance Method



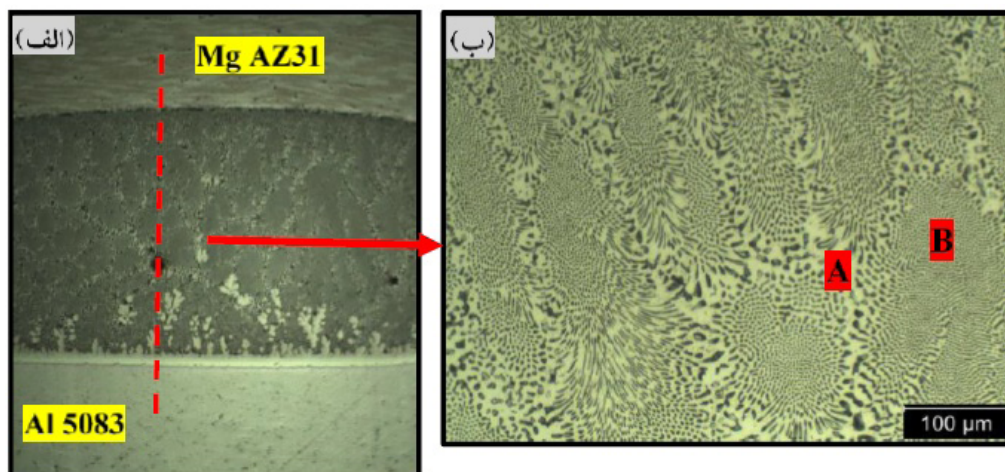
شکل ۳. (الف) نقشه جوش و ماکروساختار فصل مشترک آلیاژ Al/Mg، (ب) ریز ساختار فصل مشترک Al/Mg، (ج) تصویر SEM و نتایج EDS از ریزساختار فصل مشترک Al/Mg، (د) تشکیل ترک در فصل مشترک آلیاژ Al و آلیاژ Mg در ناحیه همزده جوش همزن اصطکاکی Al5083 به MgAZ31 انجام شده در هوا.

شکل ۳ الف نشان دهنده نقشه جوش برای جوش همزن اصطکاکی‌ای است که بین Al و Mg انجام پذیرفته است. مشخصه این ماکرو ساختار، تغییر شکل پلاستیک شدید آلیاژهای Al و Mg است که باعث اختلاط کامل آنها در یکدیگر شده است. شکل ۳ ب ریز ساختار فصل مشترک Al/Mg را در نمونه‌ای که FSW شده، نشان می‌دهد. وقوع رشد دانه ایستا^۸ در دانه‌های Mg تبلور مجدد یافته در این ناحیه، مشهود است. اندازه متوسط دانه‌های Mg در این ناحیه ۲۰ μm است. شکل ۳ ب نشان می‌دهد که مقادیر قابل توجهی ترکیبات بین‌فلزی، به صورت فازهایی که به صورت روشن و تیره حکاکی شده اند، در ناحیه همزده جوش وجود دارند. لایه‌ای که به صورت روشن تر حکاکی شده در سمت Al و لایه‌ای که تیره تر حکاکی شده، در سمت Mg قرار دارد. دومی، به خاطر محتویات منیزیم بیشتری که دارد، حساسیت بیشتری در برابر خوردگی داشته و به صورت حفرات تیره‌ای، بیشتر حکاکی شده است. این ناحیه (شکل ۳ ب) با استفاده از SEM (شکل ۳ ج) مورد مطالعه بیشتر قرار گرفت. مطالعات SEM نشان داد که ناحیه فصل مشترک اتصال Mg/Al مشتمل می‌باشد بر یک ناحیه انتقالی در سمت فلز پایه Mg (شکل

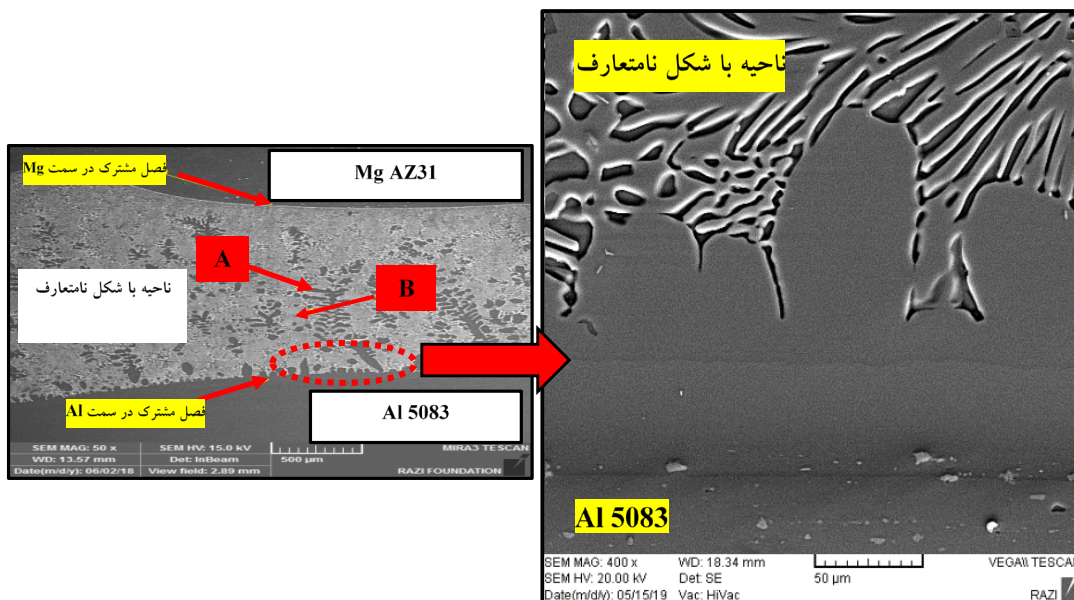
۳ ج - ناحیه ۱) و یک ناحیه انتقالی در سمت فلز پایه Al (شکل ۳ ج - ناحیه ۲). چگونگی توزیع عناصر Al و Mg در این نواحی با استفاده از EDS بررسی شده و نتایج آن در شکل ۳ ج نشان داده شده است. نواحی ۱ و ۲ دارای ترکیبات شیمیایی متفاوتی هستند. به این صورت که ناحیه ۱ دارای محتویات Al کمتر نسبت به ناحیه ۲ می‌باشد. با توجه به نمودار فاز سیستم آلومینیوم-منیزیم [۲۴] و شکل ۳، انتظار می‌رود که لایه‌هایی از فازهای بین‌فلزی تشکیل شده باشند. ضخامت متوسط لایه‌های واکنشی در جوش همزن اصطکاکی ۵۵ μm است. فازهای جدید عبارتند از ترکیبات بین‌فلزی Al_3Mg_2 و $Al_{12}Mg_{17}$. این فازها، ترکیبات تردی هستند که دلیل اصلی ایجاد ترک در جوش می‌باشند. تشکیل هر دو ترکیب، به عنوان محصولات اتصال‌دهی حالت-جامد، در مراجع گزارش شده است [۱، ۲۵ و ۲۶]. شکل ۳ د، نشان‌دهنده ترک‌های پر تعدادی است که در فاز حکاکی-سفید، تشکیل شده‌اند و مبین ترد شدن جوش به خاطر وجود ترکیبات بین‌فلزی هستند.

سطح مقطعی از اتصال نفوذی غیرهمجنس انجام شده تحت شرایط فشار اتصال ۱ Mpa و در دمای اتصال دهی ۴۳۵ °C در مدت زمان اتصال دهی ۶۰ min در شکل ۴ الف نشان

8. Static Grain Growth



شکل ۴. (الف) تصویر با بزرگنمایی پایین (ب) تصویر میکروسکوپی از ناحیه با شکل غیرمتعارف از جوش نفوذی غیر همجنس Al5083 به MgAZ31 انجام شده در ۴۳۵ °C به مدت ۶۰ دقیقه.

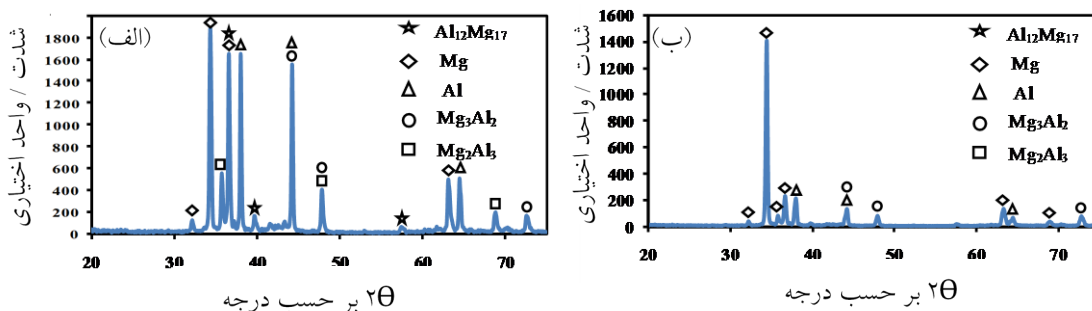


شکل ۵. تصویر SEM از ناحیه با شکل غیرمتعارف از جوش نفوذی Al5083 به MgAZ31.

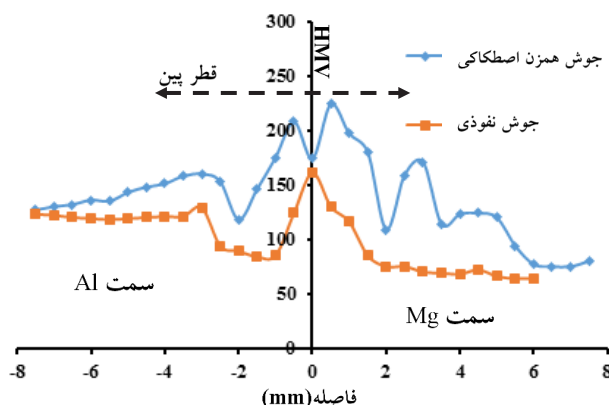
۵ ارایه شده است. تحلیل کمی ترکیب شیمیایی با استفاده از EDS نشان دهنده این بود که فاز روشن در شکل ۴ متشکل از ۳۸%wt آلومینیوم و ۶۲%wt منیزیم است، در حالیکه فاز تیره رنگ متشکل از ۱۳%wt آلومینیوم و ۸۷%wt منیزیم می‌باشد. این نتیجه تداعی کننده این موضوع است که فازهای سفید و تیره در شکل ۴، به ترتیب عبارتند از $Al_{12}Mg_{17}$ و محلول جامد Mg.

طیف‌های XRD پودرهای دو نمونه که از ناحیه با شکل نامتعارف نمونه جوشکاری نفوذی و ناحیه همزده نمونه FSW تهیه شده بودند در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود قله‌های بلندی از ترکیب بین‌فلزی $Al_{12}Mg_{17}$ ردیابی شده‌اند، هرچند این شکل حاوی قله‌هایی که از زمینه

داده شده است. جوش نفوذی، عاری از عیوب بزرگ می‌باشد، اما حاوی ناحیه‌ای با شکل غیرمتعارف در مرکز جوش است. تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری از این ناحیه با شکل نامتعارف در شکل ۴ ب نشان داده شده است. به نظر می‌رسد که این ناحیه با شکل نامتعارف، دارای ریز ساختاری انجمادی باشد. همانطور که در شکل ۴ ب، نشان داده شده، این ریز ساختار متشکل از نواحی «الف» و «ب» می‌باشد. ناحیه «الف» تنها از یک فاز سفید رنگ و ناحیه «ب» دارای یک ریز ساختار یوتکتیک متشکل از فازهای روشن و تیره تشکیل شده‌اند. این ریز ساختار، کاملاً متفاوت از دو فلز پایه می‌باشد. توزیع Al و Mg در ناحیه با شکل نامتعارف، با استفاده از EDS مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج آن در شکل



شکل ۶. طیف‌های XRD مربوط به پودرهای دو نمونه به دست آمده در (الف) ناحیه همزده جوش همزن اصطکاکی (ب) ناحیه با شکل نامتعارف از جوش نفوذی.



شکل ۷. پروفیل‌های سختی ویکرز در وسط سطح مقطع نمونه‌ها، در امتداد ناحیه با شکل نامتعارف از جوش نفوذی و ناحیه همزده از جوش همزن اصطکاکی.

پیشرونده جوش قرار دارد (T۲) نیز دمای بیشتری نسبت به دماسنج دوم قرارگرفته در سمت پسرونده جوش (T۴) نشان می‌دهد. واضح است که ماده‌ای که در سمت پیشرونده جوش قرار دارد، فاصله سیلان طولانی را تجربه کرده و به همین خاطر به دماهای بالاتری نسبت به ماده‌ای که در سمت پسرونده جوش قرار دارد، می‌رسد.

چرخه دمایی نمونه FSW که در هوا جوشکاری شده است نشانگر یک ترازشدگی ۱۰ کاملاً آشکار در دمای حدود ۴۳۰ °C است که در حدود ۸ ثانیه ادامه دارد (شکل ۲). در سرعت حرکت خطی ۵۰ mm/min، فاصله متناظر با ۸ ثانیه، حدود ۷ میلی‌متر است، که عبارت است از قطر پین. وجود این ترازشدگی دمایی، مبین آن است که با عبور پین از روی هر دماسنج، دما در آن دماسنج، ثابت باقی می‌ماند. این موضوع همچنین می‌تواند مبین آن باشد که یک واکنش یونکتیک اتفاق افتاده و همین موضوع سبب ثابت ماندن دما در لحظه عبور پین از روی دماسنج شده است. همانطور که از پروفیل‌های دمایی شکل ۲ برمی‌آید، دمای اتصال‌دهی ۴۳۵ °C، که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، معادل دمایی است که در هنگام FSW با سرعت چرخش ابزار ۴۰۰ rpm و سرعت خطی ۵۰ mm/min تجربه می‌شود.

آلیاژهای Al و Mg حاصل شده‌اند نیز هست. وجود قله‌های مربوط به Al و Mg به مخلوط شدن این دو فلز پایه با پودر تهیه شده از فازهای ثانویه مربوط می‌شود. طیف XRD، تایید می‌نماید که ناحیه با شکل نامتعارف و همچنین منطقه همزده از این دو جوش غیر همجنس، حاوی حجم زیادی از ترکیب بین‌فلزی $Al_{12}Mg_{17}$ هستند.

منحنی‌های ریز سختی (HV۰.۰۵) در وسط ضخامت سطح مقطع نمونه‌ها، در امتداد ناحیه با شکل نامتعارف از جوش نفوذی و ناحیه همزده از نمونه FSW در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. تعدادی مقادیر نسبتاً بالای سختی در فصل مشترک نمونه‌های جوشکاری نفوذی و همزن اصطکاکی ملاحظه می‌گردد. فلزات پایه آلیاژهای Al و Mg دارای مقادیر سختی متوسط به ترتیب ۱۲۸ و ۷۲ ویکرز هستند. این در حالی است که ناحیه همزده و ناحیه با شکل نامتعارف در مرکز جوش، دارای مقادیر سختی بین ۱۲۰ و ۲۲۴ ویکرز هستند. این سختی بالاتر به تشکیل ترکیب بین‌فلزی $Al_{12}Mg_{17}$ مربوط می‌شود.

در پروفیل دمایی مربوط به نمونه FSW در شکل ۲، دماسنج اولی که در سمت پیشرونده قرار دارد (T۱)، در مقایسه با دماسنج قرارگرفته در سمت پسرونده (T۳) دمای بالاتری را نشان می‌دهد. همچنین دماسنج دومی که در سمت

10. Plateau

9. Vickers Microhardness

دمایی در پروفیل دمایی مربوط به جوش همزن اصطکاکی نیز می‌تواند مبین آن باشد که یک واکنش یوتکتیک اتفاق افتاده و همین موضوع سبب ثابت ماندن دما در لحظه عبور پین از روی دماسنج شده است. با این حال شواهدی دال بر تشکیل ریزساختار یوتکتیکی در جوش همزن اصطکاکی تحقیق حاضر یافت نشد. این در تضاد با تحقیقات محققین دیگری است که وقوع ذوب قانونمند را در جوش همزن اصطکاکی Al/Mg را گزارش کرده‌اند [۱۱ و ۱۲]. در مورد جوش همزن اصطکاکی، نفوذ در حالت جامد در فصل مشترک نیز می‌تواند به تشکیل فازهای بین فلزی بیانجامد. با این حال وسعت تشکیل این فازها در حد و اندازه‌ای است که نمی‌توان احتمال وقوع ذوب در ناحیه فصل مشترک را منتفی دانست.

انحلال و ناحیه پهن سازی شده در اتصال دهی فاز مذاب گذرا، به وضوح قابل مشاهده است (نگاه کنید به شکل ۵). در اولین مراحل تشکیل و رشد ترکیبات بین فلزی در هنگام جوشکاری نفوذی، نفوذ با نرخ‌های متفاوتی در هر دو طرف اتصال اتفاق می‌افتد. در همین حال، تشکیل محلول جامد فوق اشباع نیز انجام می‌شود. جوانه‌زنی بلور فازهای جدید در عیوب انجام می‌شود. هر جا غلظت عنصر نفوذ کرده بالا باشد، جوانه‌زنی بلور ترکیبات بین فلزی و رشد آن‌ها در امتداد فصل مشترک اتفاق خواهد افتاد. بسیاری از این جوانه‌های رشد کرده به یکدیگر ملحق شده و معمولاً به صورت طولی رشد می‌نمایند (نگاه کنید به شکل ۵). پس از آن، جوانه زنی بلوری ترکیب بین فلزی دوم و رشد آن در فصل مشترک انجام خواهد شد.

عدم تشکیل حفرات کرکندال در ناحیه انتقالی را می‌توان به نزدیک بودن ضرایب نفوذ آلومینیوم و منیزیم، که به ترتیب $2/29 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ و $1/89 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ هستند و نیز نزدیک بودن جرم اتمی این دو فلز که به ترتیب 27 g/mol و 24 g/mol می‌باشند، مربوط دانست [۲۹]. بر طبق تصاویر، هیچ ریز حفره‌ای در ناحیه نفوذی تشکیل نشده است.

۴. نتیجه‌گیری

جوشکاری غیرهمجنس نفوذی و همزن اصطکاکی آلیاژ Al5083 و MgAZ31 به ترتیب در دمای اتصال دهی و دمای بیشینه یکسان 435°C انجام پذیرفت. نتایج را میتوان به صورت زیر مرور کرد:

- ۱- در مورد نمونه FSW، دمای اندازه‌گیری شده تا بیشینه 435°C در اطراف سمت پیشرونده ابزار افزایش یافت. برای این نمونه از سرعت چرخش 400 rpm و سرعت حرکت خطی 50 mm/min استفاده شده بود.
- ۲- جوش غیرهمجنس همزن اصطکاکی و نفوذی آلیاژهای Al5083 و MgAZ31 باعث تشکیل ناحیه‌ای با شکل نامتعارف در مرکز جوش نفوذی و فصل مشترکی لایه‌لایه

طبق نمودار فازی Mg-Al، هنگامی که Al و Mg با هم حرارت داده می‌شوند، امکان تشکیل ترکیبات بین‌فلزی Al_3Mg_2 و $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ وجود دارد، که اولی در سمت Al و دومی در طرف Mg تشکیل می‌شوند. با ادامه گرمایش، واکنش یوتکتیک $\text{Mg} + \text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} \rightarrow \text{L}$ در دمای یوتکتیک 437°C و واکنش یوتکتیک $\text{L} \rightarrow \text{Al} + \text{Al}_p\text{Mg}_p$ در دمای 450°C اتفاق می‌افتد. به این واکنش‌های تشکیل مذاب، ذوب قانونمند^{۱۱} گفته می‌شود [۱۱]. دمای یوتکتیک 437°C و 450°C ، حدوداً 200°C کمتر از نقطه ذوب‌های Al و Mg هستند و امکان رسیدن به چنین دماهایی در هنگام FSW و تشکیل لایه‌های نازکی از مذاب در امتداد فصل مشترک کاملاً وجود دارد. تشکیل همین لایه‌های مذاب است که نهایتاً باعث ترک خوردن جوش خواهد گردید [۱۲].

جوش غیر همجنس همزن اصطکاکی و نفوذی آلیاژهای Al 5083 و MgAZ31 باعث تولید ترکیب بین‌فلزی $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ در مرکز جوش گردید، که همین باعث افزایش قابل توجه سختی در ناحیه جوش در مقایسه با فلز پایه شد. نتایج میکروسکوپ نوری و EDS، نشانگر آن هستند که ناحیه دارای شکل نامتعارف در جوش نفوذی دارای ریز ساختاری انجمادی است که دستخوش یک واکنش یوتکتیک $\text{Mg} + \text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} \rightarrow \text{L}$ پس از انجماد اولیه $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ شده است.

جوشکاری همزن اصطکاکی و نیز جوشکاری نفوذی، فرایندهای اتصال دهی حالت جامد هستند که معمولاً باعث ذوب شدن ماده مورد جوشکاری نمی‌شوند. با این حال، در مورد FSW و اتصال نفوذی غیرهمجنس، امکان وقوع ذوب قانونمند در حین فرآیند همزدن در جوش همزن اصطکاکی و نیز در هنگام نفوذ در جوش نفوذی وجود دارد. از آنجایی که ماده جوشکاری شده در حین FSW همزمان با به هم زده شدن، حرارت نیز داده می‌شود، اتم‌های Al و Mg در فصل مشترک‌های بین نوارهای متناوب، در یکدیگر نفوذ متقابل می‌کنند. بر اساس نتایج به دست آمده، جوش غیر همجنس همزن اصطکاکی باید در معرض دماهای بیشینه بالاتر از 435°C در هنگام همزده شدن قرار گرفته باشد. این دمای بیشینه، برای نفوذ متقابل بین اتم‌های Al و Mg کفایت می‌کند. علاوه بر این، نرخ نفوذ در این حالت (FSW) باید بالاتر از شرایط ایستای نفوذ باشد، زیرا یاشان و همکارانش [۲۷] در یکی از مطالعات قبلیشان بر روی جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ و فولاد زنگ نزن ۳۱۶، نشان دادند که نفوذ در هنگام اعمال تغییر شکل پلاستیک با نرخ کرنش بالا، تسریع می‌گردد. نمودار فاز دو تایی Mg-Al [۲۴] نشان دهنده دماهای یوتکتیک تعادلی در 437°C و 450°C است. نفوذ متقابل شدید می‌تواند باعث تشکیل فاز مذاب شده که در هنگام نگه داشته شدن به صورت ثابت در دماهای بالاتر از 435°C به صورت قانونمند تشکیل میشود. ترازشدگی

نفوذی و جوش همزن اصطکاکی تشکیل شده است و همین امر باعث افزایش سختی در ناحیه جوش گشته است.

۴- با انجام جوشکاری در دمای پایین، می‌توان تشکیل لایه واکنشی ترکیبات بین‌فلزی را تا حدود زیادی کاهش داد، اما نمی‌توان به طور کامل از تشکیل ترکیبات ترد بین‌فلزی بین Al-Mg ممانعت به عمل آورد.

در جوش همزن اصطکاکی گردید. ریز ساختار این نواحی، متفاوت از دو فلز پایه بود و سختی آن‌ها نیز کاملاً با دو فلز پایه اختلاف داشت.

۳- ناحیه با شکل نامتعارف در جوش نفوذی و فصل مشترک Al و Mg در جوش همزن اصطکاکی، حاوی حجم بزرگی از ترکیب بین‌فلزی $Al_{12}Mg_{17}$ می‌باشد. ترکیب بین‌فلزی $Al_{12}Mg_{17}$ ، احتمالاً در اثر وقوع ذوب قانونمند و نفوذ در حالت جامد در فصل مشترک، به ترتیب در مرکز جوش

References

- [1] V. Firouzdar, S. Kou, Al-to-Mg friction stir welding effect of material position, travel speed, and rotation speed. *Metall. Mater. Trans. A* 2010, 41, 2914-2935.
- [2] Y. Yan, D. T. Zhang, C. Qiu, W. Zhang, Dissimilar friction stir welding between 5052 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 2010, 20, S619-S623.
- [3] U. F. H. Suhuddin, V. Fischer, J. F. dos Santos, The thermal cycle during the dissimilar friction spot welding of aluminum and magnesium alloy. *Scr. Mater.* 2013, 68, 87-90.
- [4] D. Dietrich, D. Nickel, M. Krause, T. Lampke, M. P. Coleman, V. Randle, Formation of intermetallic phases in diffusion welded joints of aluminium and magnesium alloys. *J. Mater. Sci.* 2011, 46, 357-364.
- [5] M. Jafarian, M. SaboktakinRizi, M. Jafarian, M. Honarmand, H. R. Javadinejad, A. Ghaehri, M. T. Bahramipour, M. Ebrahimi, Effect of thermal tempering on microstructure and mechanical properties of Mg-AZ31/Al-6061 diffusion bonding.
- [6] H. Wang, L. Liu, F. Liu, The characterization investigation of laser-arc-adhesive hybrid welding of Mg to Al joint using Ni interlayer. *Mater. Des.* 2013, 50, 463-466.
- [7] D. X. Ren, L. M. Liu, Y.F. Li, Investigation on overlap joining of AZ61 magnesium alloy: Laser welding, adhesive bonding and laser weld bonding. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2012, 61, 195-204.
- [8] S. H. Chowdhury, D. L. Chen, S.D. Bhole, X. Cao, P. Wanjara, Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded dissimilar magnesium-to-aluminum joints with adhesive. *Mater. Sci. Eng. A* 2013, 562, 53-60.
- [9] M.A. Mofid, A. Abdollah-Zadeh, F. MalekGhaini, The effect of water cooling during dissimilar friction stir welding of Al alloy to Mg alloy. *Mater. Des.* 2012, 36, 161-167.
- [10] D. H. Choia, B. W. Ahna, C. Y. Leec, Y. M. Yeon, K. Song, S. B. Jung, Formation of intermetallic compounds in Al and Mg alloy interface during friction stir spot welding. *Intermetallics* 2011, 19, 125-130.
- [11] Y. S. Sato, C. Park, Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys. *Scr Mater.* 2004, 50:1233-1236.
- [12] A. Gerlich, P. Su, T. H. North, Peak temperatures and microstructures in aluminium and magnesium alloy friction stir spot welds. *Sci. Technol. Weld. Join.* 2005, 10, 647-652.
- [13] M.A. Mofid, A. Abdollah-Zadeh, F. MalekGhaini, C. H. Gur, Submerged Friction-Stir Welding (SFSW) Underwater and Under Liquid Nitrogen: An Improved Method to Join Al Alloys to Mg Alloys, *Metallurgical and materials transactions A*, 2012. 43, 5106-5114.
- [14] M.J. Fernandus, T. Senthilkumar, V. Balasubramanian, S. Rajakumar. Optimizing diffusion bonding parameters in AA6061-T6 aluminum and AZ80 magnesium alloy dissimilar joints. *J. Mater. Eng. Perform.* 2012, 21, 2303-2315.
- [15] J. Shang, K. H. Wang, Q. Zhou, D. K. Zhang, J. Huang, J.Q. Ge, Effect of joining temperature on microstructure and properties of diffusion bonded Mg/Al joints. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 2012, 22, 1961-1966.
- [16] D.Q.Sun, W.H.Liu, X.Y.Gu, Transient liquid phase bonding of magnesium alloy (Mg-3Al-1Zn) usingcopper interlayer. *Mater. Sci. Technol.* 2004, 20, 1595-1598.
- [17] A.N.AlHaza, Effect of Bonding Temperature on the Microstructure and Strength of the Joint between Magnesium AZ31 and Ti-6Al-4V Alloys Using Copper Coatings and Tin Interlayers. *Key Eng. Mater.* 2017,735, 34-41.
- [18] A.M.Atieh, T.I. Khan; Transient liquid phase (TLP) brazing of Mg-AZ31 and Ti-6Al-4V using Ni and Cusandwich foils. *Sci. Technol. Weld. Join.* 2014, 19, 333-342.
- [19] B. C.Zhou, S. L.Shang, Y.Wang; Z.K. Liu, Data set for diffusion coefficients of alloying elements in diluteMg alloys from first-principles. *Data Brief* 2015, 5, 900-912.
- [20] J.Dai, B.J. Jiang, The solidification of multicomponent alloys. *Phase Equilib. Diffus.* 2015, 36, 4-18.
- [21] A. C. Somasekharan, L. E. Murr, Microstructures in friction-stir welded dissimilar magnesium Alloys and magnesium Alloys to 6061-T6 Aluminum Alloy, *Mater.Charact.* 52(2004) 49-64.
- [22] A.A. McLean, G.L.F. Powell, I.H. Brown, and V.M. Linton: *Sci. Tech. Weld. J.*, 2003, vol. 8, pp. 462-64.
- [23] ASTM Committee A01 (2010) A1038-10 standard practice for portable hardness testing by the ultrasonic contact impedance-method.
- [24] ASM International: *ASM Handbook*, vol. 3: Alloy Phase Diagrams, ASM International, Materials Park, OH, 1998.
- [25] R. Zettler: *Adv. Eng. Mater.*, 2006, vol. 8, pp. 415-21.
- [26] A. K. Kostka, R. S. Coelho, J. dos Santos, and A.R. Pyzalla: *Scripta Mater.*, 2009, vol. 60, pp. 953-56.
- [27] D. Yashan, S. Tsang, W. L. Johns, M. W. Doughty. *Weld J* 1987; 66:27.
- [28] U. F. H. Suhuddin, V. Fischer, J. F. dos Santos, The thermal cycle during the dissimilar friction spot welding of aluminum and magnesium alloy, *ScriptaMaterialia*, 68(1), 2013, 87-90.
- [29] L. Liu, L. Zhao, R. Xu, Effect of interlayer composition on the microstructure and strength of diffusion bonded Mg/Al joint, *Mater. Des.* 30(2009) 4548-4551.