

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



## Al/Mg bimetal production in constant melt to solid volume ratio and various preheating temperatures and rotational speeds

### Abstract

Dissimilar joining of magnesium–aluminum metals was conducted via a solid-melt state cast joining process, i.e. centrifugal casting. One of the main factors that determine the behavior of interface between melt and solid, is the preheating temperature. In this investigation, magnesium and aluminum metals (aluminum as the cast metal and magnesium as the solid) having melt-to-solid volume ratios ( $V_m/V_s$ ) of 0.9 bonded via centrifugal casting. Preheating temperature was selected between 30 to 250 Celsius and rotational speed were 800, 1200 and 1600 per minute respectively. Results demonstrated that by increasing the preheating temperature up to a critical point, the melt can rise to the top of mould before solidifying. With preheating temperature, 250 °C, Mg bush was filled completely (100%) with aluminum melt but without preheating melt only (71%) filling was noticed. Two types of bonding (mechanical or metallurgical) happened depending on preheating temperature and rotational speed.

**Keywords :** Aluminium-Magnesium Bimetal, Centrifugal Casting, Metallurgical bonding, Interface

## تولید جفت فلزی آلومینیم - منیزیم در نسبت حجمی ثابت و دمای پیش گرم و سرعت دوران متفاوت

### چکیده

امروزه شرکت‌های خودروسازی، با توجه افزایش قیمت سوخت و آلودگی محیط زیست، به سمت طراحی بهینه قطعات از طریق کاهش وزن آن‌ها تمایل و رغبت زیادی را نشان می‌دهد. در این راستا، فلز منیزیم، با داشتن نسبت استحکام به وزن مناسب، می‌تواند جایگزین قابل قبولی به جای قطعات فولادی و چدنی باشد. مقاوم به خوردگی و عملکرد فلز منیزیم در دمای بالا ضعیف بوده، بنابراین لازم است در کنار فلز مثل آلومینیم، که مقاومت به خوردگی مناسبی دارد، به کار گرفته شود. ایجاد اتصال مناسب بین جفت‌های آلومینیم و منیزیم که دارای خواص مکانیکی و متالورژیکی مناسب باشد، می‌تواند منجر به افزایش کاربرد این فلزات سبک در صنعت و کاهش مصرف سوخت شود. تا به حال روش‌های اتصال مختلفی برای اتصال این دو فلز غیر هم‌جنس استفاده شده است. در این تحقیق از روش ریخته‌گری مرکب با استفاده از دستگاه ریخته‌گری گریز از مرکز عمودی استفاده شده است. بدین منظور مذاب آلومینیم، با نسبت حجمی مذاب به جامد برابر ۰.۹، در داخل بوش منیزیم جامد در حال دوران، با سرعت‌های ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۱۶۰۰ دور بر دقیقه، در محدوده‌ی دمایی ۳۰ تا ۲۵۰ درجه‌ی سانتی-گراد ریخته‌گری شده و خصوصیات فصل مشترک تشکیل شده بین این دو فلز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌های حاصل از میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی (SEM)، پراش اشعه ایکس (XRD) و ریزسختی ویکرز بر روی اتصال این فلزات نشان داد که وقتی دمای پیش‌گرم مذاب ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انتخاب می‌شود، اتصال متالورژیکی بین جفت‌های آلومینیم - منیزیم ایجاد می‌شود. البته حضور اسپینل  $\text{AlMg}_2\text{O}_4$  در فصل مشترک به جز ترکیبات بین فلزی آلومینیم و منیزیم نیز مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جفت آلومینیم - منیزیم، اتصال متالورژیکی، ریخته‌گری گریز از مرکز، فصل مشترک

## مقدمه

امروزه مصرف آلومینیم و منیزیم در صنعت حمل‌ونقل، به‌منظور کاهش وزن و مصرف انرژی، به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. در بسیاری موارد هر یک از این فلزها به تنهایی نمی‌توانند انتظارات لازم برای خواص مطلوب را برآورده سازند. آلیاژهای منیزیم دارای خواص مناسبی مانند چگالی کم، نسبت استحکام به وزن بالا و قابلیت ریخته‌گری مناسب هستند اما از طرف دیگر چقرمگی پایین و مقاومت به خزش کم از خواص نامطلوب آن‌ها به حساب می‌آید. از سوی دیگر آلیاژهای آلومینیم در کنار چقرمگی بالاتر، می‌توانند استحکام خود را در دماهای بالاتری نیز حفظ کنند (مرتضی مرکبیان اصفهانی، و همکاران، ۱۳۹۲). لذا با کنار هم قرار دادن فلزات غیر هم‌جنس آلومینیم و منیزیم، به‌صورت جفت‌های فلزی، می‌توان خواص چندگانه را در یک قطعه ایجاد کرد (Zhang, Chen, & Luo, 2014). تا به امروز برای کنار هم قرار گرفتن فلزات آلومینیم و منیزیم، روش‌های اتصال مختلفی استفاده شده است. این روش‌های اتصال را می‌توان بر اساس نوع فصل مشترک ایجاد شده بین فلزات به‌صورت، جامد/جامد یا مذاب/جامد، تقسیم‌بندی کرد. به دلیل پایین بودن دمای تشکیل ترکیبات بین فلزی آلومینیم-منیزیم که حدود ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد است، تقریباً بیشتر روش‌های اتصال اعم از جوشکاری (Chen & Nakata, 2008)، شکل‌دهی (Paramsothy, Gupta, & Srikanth, 2008) و ... دارای فصل مشترک مذاب/جامد هستند. فرآیندهای جوشکاری مختلفی برای اتصال جفت‌های آلومینیم-منیزیم استفاده شده است: جوشکاری همزن اصطکاکی (Mofid, Abdollah-zadeh, & Malek Ghaini, 2012)، نفوذی (Joseph Fernandus, Senthilkumar, 2012)، اصطکاکی خطی (Balasubramanian, & Rajakumar, 2012)، اصطکاکی خطی (Bhamji, Preuss, Moat, Threadgill, & Addison, 2012) ...

علیرغم وجود مزیت‌های زیاد در روش‌های جوشکاری، یک سری محدودیت‌های صنعتی شامل، شکل‌های پیچیده و هزینه‌های بالای تجهیزات جوشکاری موضوع استفاده از فرآیند ریخته‌گری برای اتصال آلومینیم - منیزیم را مطرح ساخته است. در این روش یک فلز به‌صورت جامد و دیگری در حالت ذوب است و فلز مذاب درون یا اطراف فلز جامد ریخته‌گری می‌شود. بدین ترتیب پس از تماس مذاب با قطعه جامد، یک منطقه‌ی نفوذی-واکنش بین دو فلز یا آلیاژ شکل گرفته و منجر به شکل‌گیری پیوند فلزی و اتصال بین آن‌ها می‌شود. به این روش، ریخته‌گری مرکب<sup>۱</sup> (Volder JP, 1993) یا اتصال ریختگی<sup>۲</sup> اطلاق شده (Han & Huh, 2012) و ریخته‌گری مرکب به‌صورت ریخته‌گری ثقیلی (Emami, Divandari, Arabi, & Hajjari, 2012) یا دایکاست انجام می‌شود. اخیراً شرکت اتومبیل‌سازی BMW با استفاده از فرآیند ریخته‌گری دایکاست تحت فشار، موفق به ساخت کامپوزیت جفت فلزی آلومینیم-منیزیم شده است، به‌طوری که آلومینیم به‌صورت جامد و منیزیم به‌صورت مذاب در اطراف آن به روش دایکاست ریخته‌گری می‌شود.

<sup>1</sup> compound casting

<sup>2</sup> cast joining

بایستی توجه شود که روش ریخته‌گری گریز از مرکز عموماً برای ایجاد سطوح مقاوم به سایش در قطعات استوانه‌ای استفاده می‌شود (Niu, Hojamberdiev, & Xu, 2010). البته فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز به دو صورت افقی و عمودی اجرا می‌شود (Chirita, Soares, & Silva, 2008)، که در این تحقیق از ریخته‌گری گریز از مرکز عمودی برای تولید جفت فلزی آلومینیم-منیزیم استفاده شده است. منیزیم به‌عنوان جامد به‌صورت بوش در دستگاه قرار گرفته و ذوب آلومینیم درون آن ریخته می‌شود.

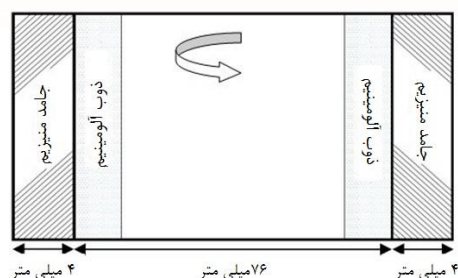
### روش پژوهش:

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق، شامل شمش‌های آلومینیم و منیزیم خالص تجارتي بودند که ترکیب شیمیایی هر یک از آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ - ترکیب شیمیایی مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق

عناصر (درصد وزنی)							ماده
Mn	Cu	Zn	Fe	Si	Mg	Al	
۰/۰۰۶	۰	۰	۰/۰۶۴	۰/۰۸	۰/۰۲۷	۹۹/۵	شمش آلومینیم
۰/۰۰۷	۰/۰۳۶	۰/۰۹۳	۰	۰/۰۲	۹۹/۳۲	۰/۱	شمش منیزیم

برای اتصال غیرهمجنس آلومینیم و منیزیم، به روش ریخته‌گری مرکب، بوش‌های منیزیمی با قطر خارجی ۸۴ و قطر داخلی ۷۶ و ارتفاع ۳۵ میلی‌متر از شمش منیزیم ماشین‌کاری شدند. تصویر بوش‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک بوش منیزیم که با ذوب آلومینیم پر شده است

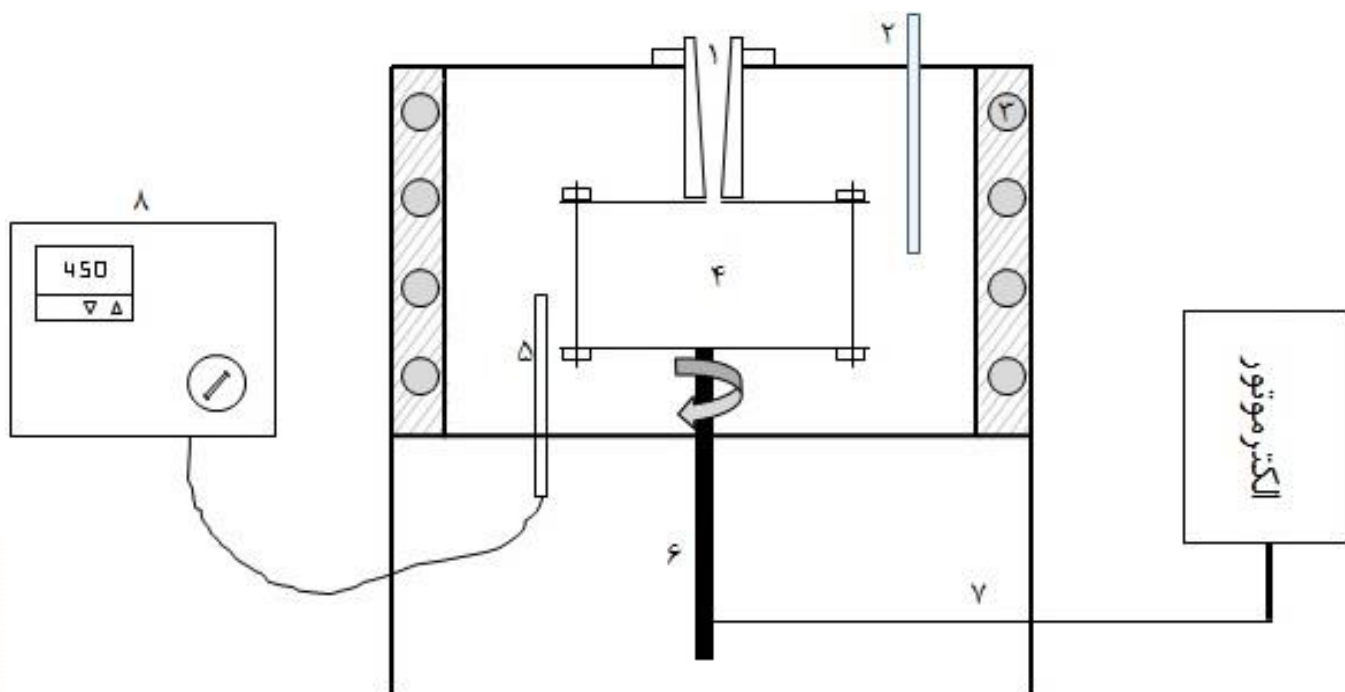
در مرحله‌ی بعد، پس از پوسابزنی تا سنباده‌ی ۱۲۰۰، بوش‌ها بوسیله‌ی استون چربی زدایی شدند، سپس به‌صورت عمودی درون دستگاه ریخته‌گری گریز از مرکز قرار گرفتند. ذوب آلومینیم در بوتله‌ی گرافیتی آماده شد و در پاتیلی با حجم مشخص (۰/۹ حجم جامد) در دمای ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ریخته شد و سپس فلز آلومینیم در درون بوش منیزیمی ریخته‌گری گردید. به‌طوری که در شکل ۲

نشان داده شده است، دستگاه گریز از مرکز مجهز به سیستم گرمایشی برای پیش‌گرم کردن نمونه‌ها است. نمونه‌ها از دمای ۳۰ تا ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، طبق دماهای نشان داده شده در جدول ۲، پیش‌گرم شدند. همچنین سرعت دوران دستگاه روی سه سرعت ۸۰۰، ۱۶۰۰، ۱۲۰۰ دور بر دقیقه برای مرحله‌ی ریخته‌گری جفت انتخاب شد.

جدول ۲ - پارامترهای متغیر در این تحقیق

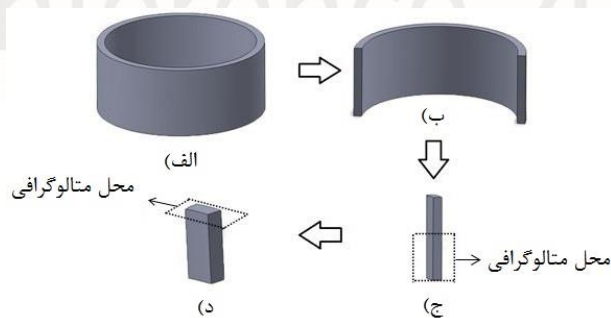
شماره‌ی نمونه	دمای پیش‌گرم (°C)	سرعت دوران (دور بر دقیقه)
۱	۳۰	۱۲۰۰
۲	۳۰	۱۶۰۰
۳	۱۰۰	۱۲۰۰
۴	۱۵۰	۱۲۰۰
۵	۲۰۰	۱۲۰۰
۶	۲۵۰	۱۲۰۰
۷	۲۵۰	۱۲۰۰
۸	۲۵۰	۱۶۰۰
۹	۲۵۰	۸۰۰





شکل ۲- شماتیک دستگاه ریخته‌گری گریز از مرکز عمودی؛ ۱- راهگاه (محل ورود مذاب) ۲- محل ورود گاز محافظ ۳- سیستم گرمایشی (المنت) ۴- محل قرارگیری بوش ۵- دماسنج (ترموکوپل) ۶- شفت ۷- تسمه‌ی انتقال نیرو

پس از انجام عملیات ریخته‌گری، نمونه‌های تهیه شده، به‌طوری که در شکل ۳ نشان داده شده، برش داده شدند. همه‌ی نمونه‌ها پس از فرایند پوسابزنی با تا شماره ۱۲۰۰ و پولیش با آلومینای یک میکرومتری، مورد بررسی ساختاری قرار گرفتند.



شکل ۳- مراحل برش نمونه برای بررسی متالوگرافی؛ الف) جفت فلزی آلومینیم- منیزیم ب) برش مقطع عرضی ج) و د) برش به نمونه‌های کوچک‌تر

تجهیزات مورد استفاده شامل میکروسکوپ نوری Olympus BX51M، میکروسکوپ الکترونی JEOL JSM-7000F، و ریزسختی سنجی مدل MXT بود. در آزمون ریزسختی ویکرز نیروهای ۲۵ و ۱۰ گرم برای قسمت منیزیمی و ۱۰۰ گرم برای دیگر قسمت‌ها،

اعمال شد و در راستای عمود بر فصل مشترک یک پروفایل سختی به دست آمد که از روی این نتایج، نمودار سختی برحسب فاصله از سطح نمونه، برای نمونه‌ها رسم گردید.

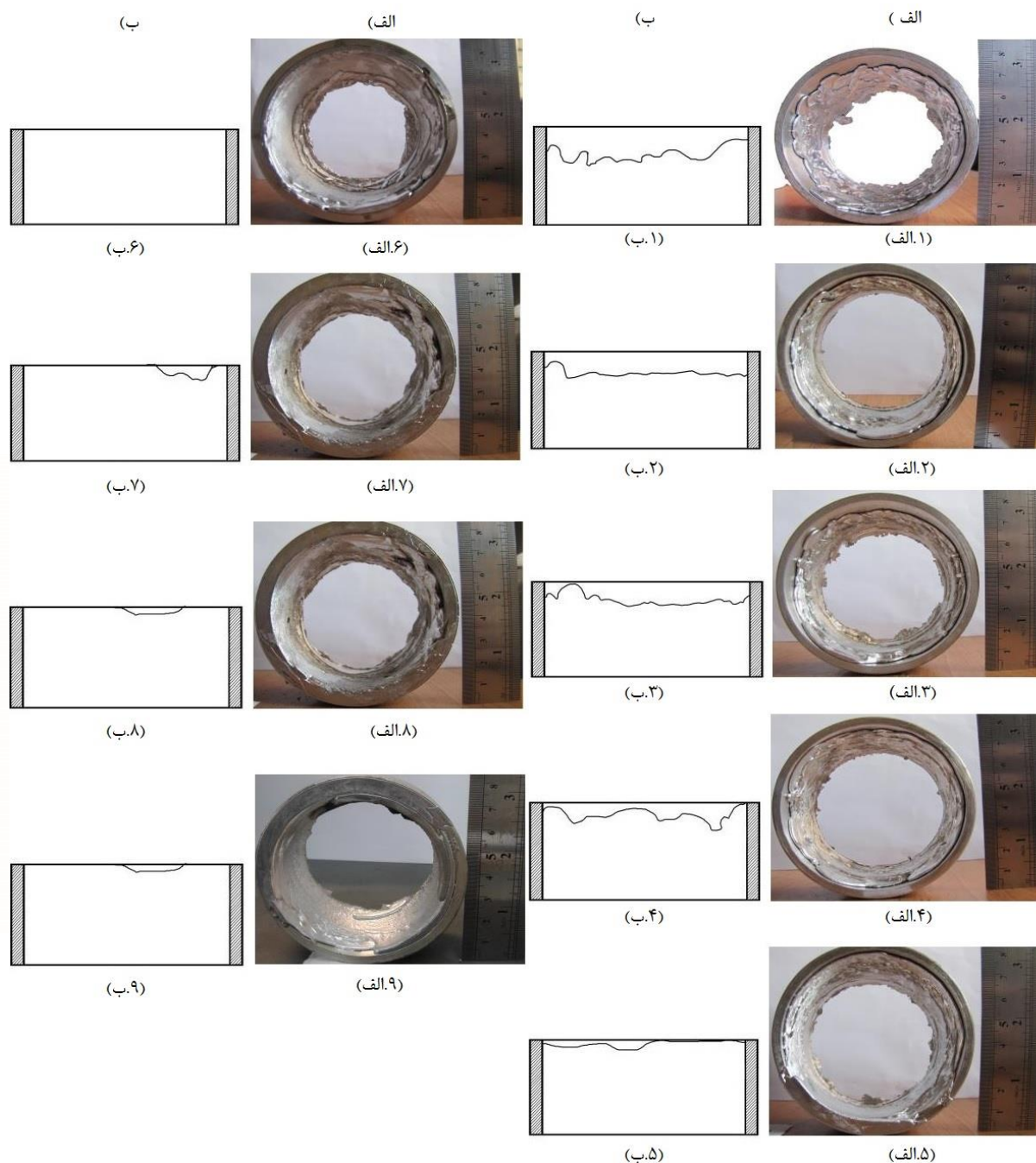
### تجزیه و تحلیل داده‌ها:

- رفتار مذاب در پر کردن بوش

در روش‌های ریخته‌گری گریز از مرکز، بستگی به این که افقی یا عمودی باشد، شرایط پر شدن قالب فرق می‌کند. با توجه به این که در این تحقیق روش گریز از مرکز عمودی انتخاب شده است، می‌توان شرایط نمایش داده شده در شکل ۴ را به عنوان روش محتمل مورد بررسی قرار داد. شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی جفت فلزی‌های آلومینیم- منیزیم، شامل ستون الف تصاویر واقعی و ستون ب شماتیک نمونه‌ها، را نشان می‌دهد.

یکی از عوامل مهم در ریخته‌گری گریز از مرکز توانایی ذوب در پر شدن کامل قالب است. سرعت دوران، دمای پیش گرم و شرایط انتقال حرارت از عوامل تعیین کننده در میزان پر شدن قالب محسوب می‌شوند. بر طبق تحقیقات انجام شده توسط ( Keerthi Prasad, Murali, & Mukunda, 2010)، زیر سرعت دوران ۶۰۰ دور بر دقیقه، شکل یکنواخت استوانه‌ای به دست نمی‌آید. دلیل این موضوع نحوه عملکرد مولفه‌های مختلف نیرو است که مولفه نیروی ثقل به سمت پایین و دو مولفه مربوط به نیروی گریز از مرکز به صورت نود درجه نسبت به این مولفه عمل می‌کنند. بدیهی است چنانچه دو مولفه اخیر بزرگ باشند قادر خواهند بود بر مولفه نیروی ثقل غلبه کنند که در این حال بوش یا استوانه توخالی تولید شده ضخامت بالنسبه یکنواخت در پایین و بالا خواهد داشت. در این تحقیق، سرعت دوران بالای ۶۰۰ دور بر دقیقه، یعنی سرعت‌های ۱۶۰۰ و ۱۲۰۰، ۸۰۰ دور بر دقیقه، برای ساخت جفت فلزی آلومینیم- منیزیم انتخاب شده است.





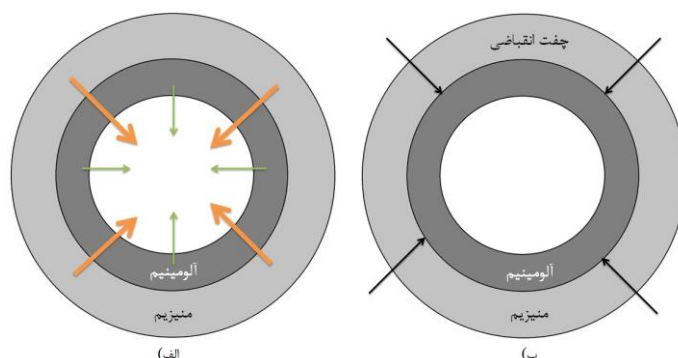
شکل ۴- ستون (الف- ۱ تا ۹) تصویر نمونه‌ها و ستون (ب- ۱ تا ۹) شماتیک میزان پر شدن پوش توسط مذاب آلومینیم را نشان می‌دهد؛ تصاویر ۱ و ۲ نشان دهنده نمونه‌های بدون پیش‌گرم و سرعت دوران به ترتیب ۱۲۰۰ و ۱۶۰۰. تصاویر ۳، ۴، ۵ مربوط به نمونه‌هایی که به ترتیب تا دمای ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد پیش‌گرم شده‌اند با سرعت دورانی ثابت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه. ۶، ۷، ۸، ۹ تصاویر ماکروسکوپی نمونه‌هایی که به ترتیب ۱۲۰۰، ۱۶۰۰، ۸۰۰ دور بر دقیقه با دمای ثابت پیش‌گرم ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تولید شده‌اند.

انجماد مذاب با برخورد به یک سطح با دمای پایین‌تر از دمای ذوب شروع می‌شود، که این انجماد به دلیل سرعت انتقال حرارت بالا، سریع و غیر تعادلی است (Hajjari, Divandari, Razavi, Emami, & Kamado, 2011). با انجماد مذاب به محض برخورد با دیواره‌ی استوانه‌ی توخالی و کاهش محتوای حرارتی مذاب، از پر شدن کامل و تر کردن قسمت جامد توسط مذاب جلوگیری خواهد شد. این پدیده منجر به جمع شدن آلومینیم در قسمت پایینی بوش منیزی می‌شود. این در حالی است که نیروی ثقل نیز در جهت ۹۰ درجه نسبت به حداقل یکی از مولفه‌های نیروی گریز از مرکز عمل کرده، بنابراین پیش گرم کردن بوش منیزی برای بهبود ترشوندگی و پر شدن کامل توسط مذاب، امر ضروری است. در جدول 2 دمای پیش گرم و سرعت دوران نمونه‌ها را نشان داده شد.

با توجه به اهمیت نقش پیش گرم کردن، در تولید جفت‌های فلزی به روش گریز از مرکز، دمای پیش گرم از ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تا دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش یافت. برای تخمین میزان توانایی ذوب در پر کردن بوش، پایین‌ترین و بالاترین نقطه‌ای که مذاب توانسته تر کند، اندازه‌گیری شده است و میانگین اعداد به صورت درصد پر شدن بوش گزارش شده است. نمونه‌ی ۱ و ۲ به ترتیب ۷۱٪ و ۷۸٪ توسط مذاب آلومینیم پر شده‌اند. این اعداد نشان دهنده‌ی این است که بدون پیش گرم کردن مذاب نمی‌تواند به طور کامل بوش را پر کند. بنابراین میزان پر شدن بوش از مذاب به دمای پیش گرم وابسته است. نمونه‌های ۸ و ۹ با وجود عملیات پیش گرم کردن، ۸۴/۱۴٪ و ۹۴/۳٪ پر شده‌اند، که این می‌تواند ناشی از ارتعاش دستگاه باشد که بر روی جریان سیال تاثیر می‌گذارد (Chirita et al., 2008). در جدول 3 میزان پر شدن بوش با تغییر دمای پیش گرم آورده شده است.

#### - شرایط اتصال در فصل مشترک

در تولید جفت‌های فلزی آلومینیم- منیزیم امکان تشکیل دو نوع اتصال، با توجه به نوع فصل مشترک ایجاد شده، وجود دارد. واکنش شیمیایی، نفوذ و انحلال در محل تماس دو فلز منجر به ایجاد فصل مشترک متالورژیکی بین دو فلز می‌شود. ولی در صورتی که هیچ واکنش و نفوذی در فصل مشترک اتفاق نیافتد و فقط اتصال توسط نیروهای انقباضی برقرار شده باشد، در این صورت اتصال از نوع اتصال مکانیکی است، که می‌توان آن را اتصال یا جفت انقباضی (Xu, Luo, Chen, & Sachdev, 2014) نیز نامید. اختلاف در ضریب انبساط حرارتی منیزیم ( $25/5 \times 10^{-6}$ ) و آلومینیم ( $24 \times 10^{-6}$ ) منجر به اختلاف در میزان انقباض منیزیم و آلومینیم شده است. به طوری که میزان انقباض منیزیم از دمای لیکئودوس تا دمای اتاق، ۰/۲٪ بیش‌تر از آلومینیم باشد. این اختلاف در میزان انقباض به ایجاد اتصال بین جفت فلزی، به‌ویژه در حالتی که هیچ اتصال متالورژیکی وجود نداشته باشد، کمک خواهد کرد و منجر به کنار هم قرار گرفتن دو فلز می‌شود. شکل ۵ اتصال مکانیکی ایجاد شده به کمک نیروهای انقباضی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. همچنین جدول 3 نوع اتصالات ایجاد شده را نیز نشان می‌دهد.



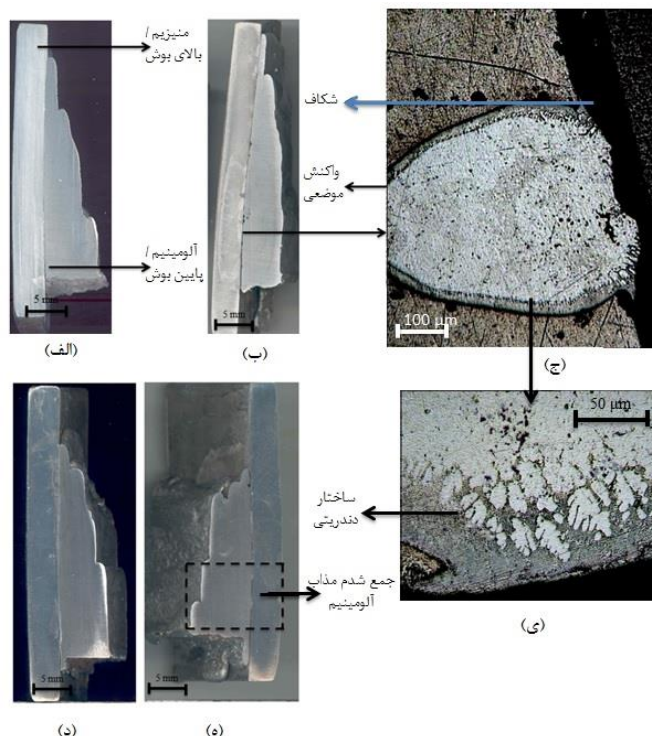
شکل ۵- نقش نیروهای انقباضی در ریخته‌گری مرکب آلومینیم- منیزیم. الف) نیروی انقباضی منیزیم بیش از آلومینیم ب) تشکیل اتصال مکانیکی بین دو فلز

جدول 3- درصد پر شدن بوش و نوع اتصال ایجاد شده

شماره‌ی نمونه	% درصد پر شدن بوش	نوع اتصال
۱	۷۱	مکانیکی
۲	۷۸	مکانیکی
۳	۷۰	مکانیکی
۴	۷۷	مکانیکی
۵	۹۱.۴۳	متالورژیکی
۶	۱۰۰	متالورژیکی
۷	۱۰۰	ذوب شدن فصل مشترک
۸	۸۷.۱۴	ذوب شدن فصل مشترک
۹	۹۴.۱۳	متالورژیکی

- بررسی میکروساختاری فصل مشترک

شکل ۶ مقطع برش نمونه‌های ۴، ۳، ۲، ۱ را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها هیچ اتصال متالورژیکی دیده نمی‌شود که در نتیجه‌ی عدم تشکیل منطقه‌ی واکنشی - نفوذی در فصل مشترک است. علاوه بر این، آلومینیم در قسمت پایین بوش جمع شده است که این نشان دهنده‌ی انجماد در مرحله‌ی اول تماس ذوب با دیواره‌ی بوش است. با ثابت بودن دمای پیش گرم و افزایش سرعت دوران، میزان تجمع آلومینیم در قسمت پایین بوش، به دلیل افزایش سرعت سرد شدن، افزایش می‌یابد، که این در نتیجه‌ی افزایش انتقال حرارت، با افزایش سرعت دوران است.



شکل ۶- الف، ب، د و ه به ترتیب مقطع عرضی نمونه‌های ۳، ۲، ۴، ۱ را نشان می‌دهد. هیچ فصل مشترک متالورژیکی در نمونه‌ها وجود ندارد. به ترتیب، نمونه‌ها تا دمای ۱۰۰، ۳۰، ۱۵۰، ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد پیش‌گرم و با سرعت دوران ۱۲۰۰، ۱۶۰۰، ۱۲۰۰، ۱۲۰۰ تولید شده‌اند. (ج) واکنش موضعی در نمونه‌ی ۴ که با افزایش دمای پیش‌گرم ایجاد شده است. (ی) ساختار دندریتی فصل مشترک در سمت منیزیم

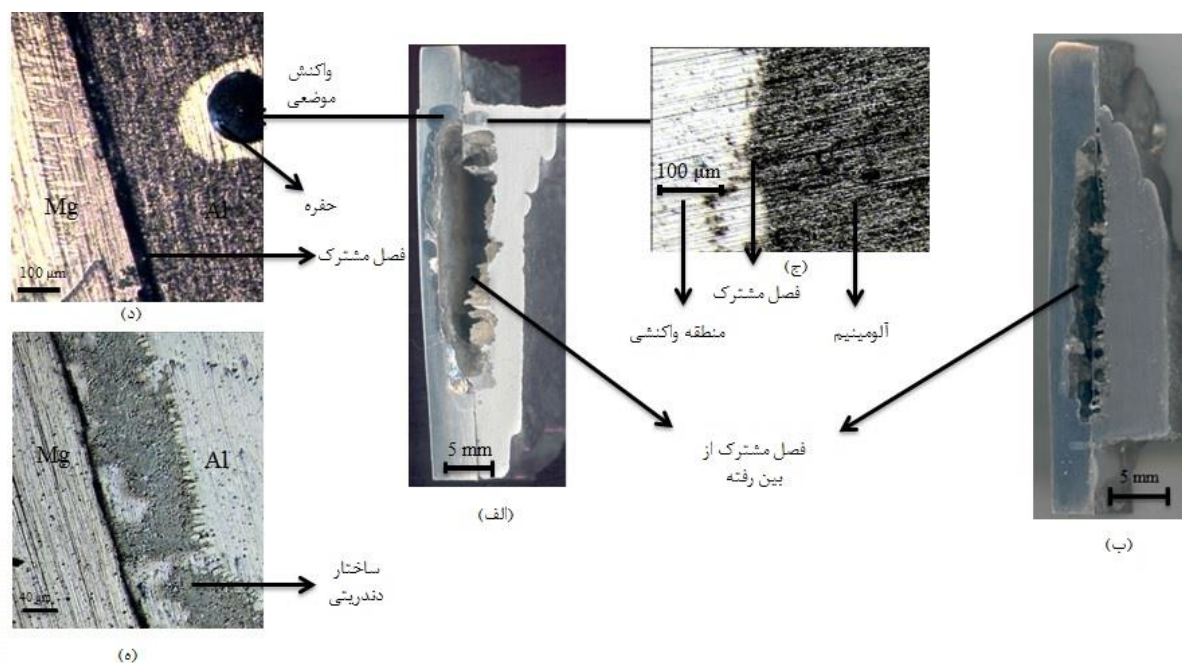
گرمای مذاب منجر به ذوب قسمتی از جامد منیزیم می‌شود، که اساس ایجاد اتصال متالورژیکی است. ولی ذوب شدن قسمت جامد در همه‌ی شرایط به ایجاد اتصال کمک نخواهد کرد. تمایل شدید مذاب منیزیم به اکسیداسیون، در برخی از نمونه‌ها منجر به اکسیداسیون قسمت ذوب شدگی شده و اکسیداسیون منیزیم منجر به از بین رفتن بخشی و یا تمام فصل مشترک می‌شود. ممکن است اکسیداسیون منیزیم محصول واکنش (۱) (Lloyd, Lagace, & Mcleod, 1990) باشد، که در اثر واکنش بین اکسید آلومینیم و منیزیم ایجاد می‌شود.



$$\Delta G^\circ = -117.4 \text{ kJ at } 1000\text{K}.$$

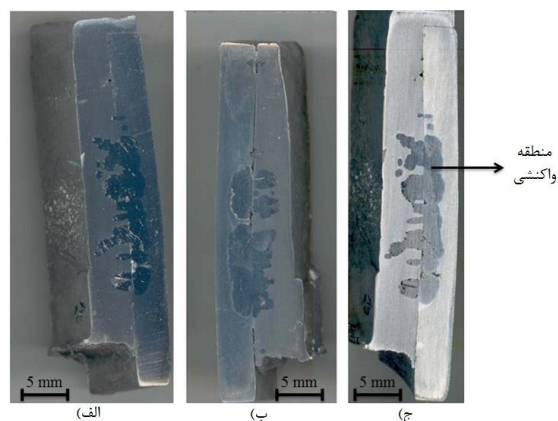
واکنش (۱) در نمونه‌های ۷ و ۸ رخ داده است. میزان اکسیداسیون در نمونه ۸ نسبت به نمونه ۷ زیادتر است. به دلیل این که با افزایش سرعت دوران از ۱۲۰۰ به ۱۶۰۰ در نمونه ۸، نیروی وارد بر مذاب بیش‌تر شده و این موضوع منجر به تماس و واکنش سریع اکسید آلومینیم با منیزیم می‌گردد. در شکل ۷ فصل مشترک‌های از بین رفته‌ی نمونه‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.





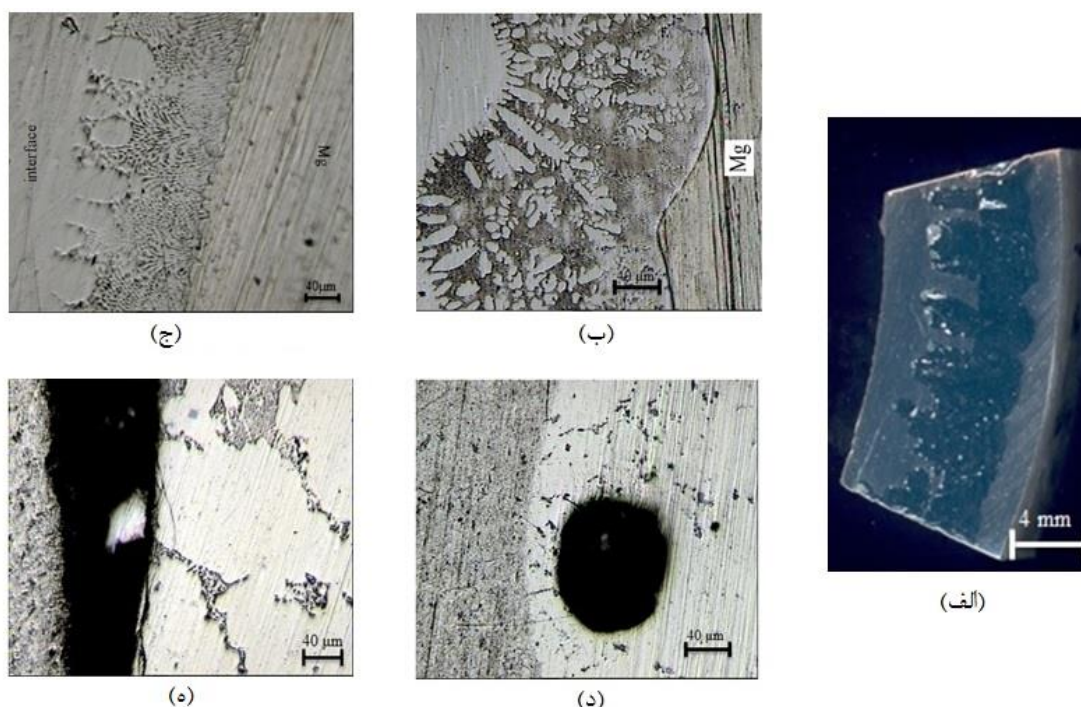
شکل ۷- (الف) و (ب) تصاویر ماکروسکوپی مقطع نمونه‌های ۷ و ۸ را نشان می‌دهند. فصل مشترک این نمونه‌ها با اکسیداسیون منیزیم از بین رفته است. (د) قسمتی از فصل مشترک باقی‌مانده در نمونه‌ی، (ه) ساختار دندریتی در فصل مشترک باقی‌مانده در نمونه‌ی ۷ در سمت منیزیمی، (ج) فصل مشترک باقی‌مانده در سمت آلومینیمی

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، در نمونه‌های ۶، ۵ و ۹ اتصال متالورژیکی بین جفت فلزی آلومینیم- منیزیم وجود دارد. در این سه نمونه اتصال متالورژیکی در بخش میانی بوش ایجاد شده است. میزان این اتصال در نمونه‌ی ۵ و ۹ نسبت به ۶ بیشتر است. همچنین در شکل ۶ (ج) دیده می‌شود که با افزایش دمای پیش‌گرم تا ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در نمونه‌ی ۴، نفوذ عناصر در یکدیگر اتفاق می‌افتد. ولی به دلیل کافی نبودن گرما لازم اتصال به‌طور کامل نبوده و به‌صورت موضعی ایجاد شده است.



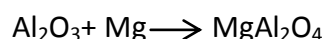
شکل ۸- (الف)، (ب) و (ج) تصویر ماکروسکوپی مقاطع نمونه‌های ۵، ۶، ۹.

تصویر میکروسکوپی فصل مشترک نمونه‌ی ۵ که دارای اتصال متالورژیکی است، در شکل ۹ شرح داده شده است. با واکنش آلومینیم و منیزیم در فصل مشترک زیر لایه‌هایی در فصل مشترک ایجاد می‌شوند. با تماس مذاب آلومینیم با بوش منیزی، انجماد به‌طور سریع آغاز می‌شود که به دنبال آن ساختار دندریتی که از سمت منیزیم به‌طرف فصل مشترک کشیده شده‌اند.



شکل ۹- مقطع متالوگرافی شده‌ی نمونه‌ی ۵ در بزرگنمایی‌های مختلف. (الف) تصویر ماکروسکوپی فصل مشترک. (ب) و (ج) سمت منیزی فصل مشترک، نشان دهنده‌ی ساختار دندریتی. (د) و (ه) سمت آلومینیمی فصل مشترک.

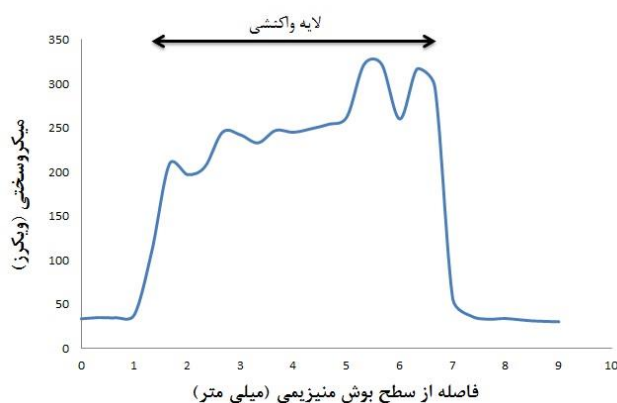
امکان ایجاد اسپینل ( $MgAl_2O_4$ ) بر طبق واکنش ۲ در فصل مشترک آلومینیم- منیزیم وجود دارد. دو شاهد بر تشکیل این اسپینل ترد در فصل مشترک وجود دارد. یکی میکروسختی سنجی و دیگری آنالیز پراش اشعه ایکس است. به‌طوری که سختی در فصل مشترک شدیداً افزایش می‌یابد و سختی از سختی فلزات پایه بالاتر می‌رود. نمودار توزیع سختی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به‌طوری که سختی فصل مشترک وابسته به محل اندازه‌گیری از ۱۱۱ ویکرز تا ۳۲۲ ویکرز تغییر می‌یابد، درحالی که آلومینیم و منیزیم دارای سختی ۳۳ و ۳۰ ویکرز هستند. همچنین، آنالیز پراش اشعه ایکس، پیک‌های مربوط به  $MgAl_2O_4$  را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ پیک‌های به دست آمده از آنالیز پراش اشعه ایکس را نشان می‌دهد.



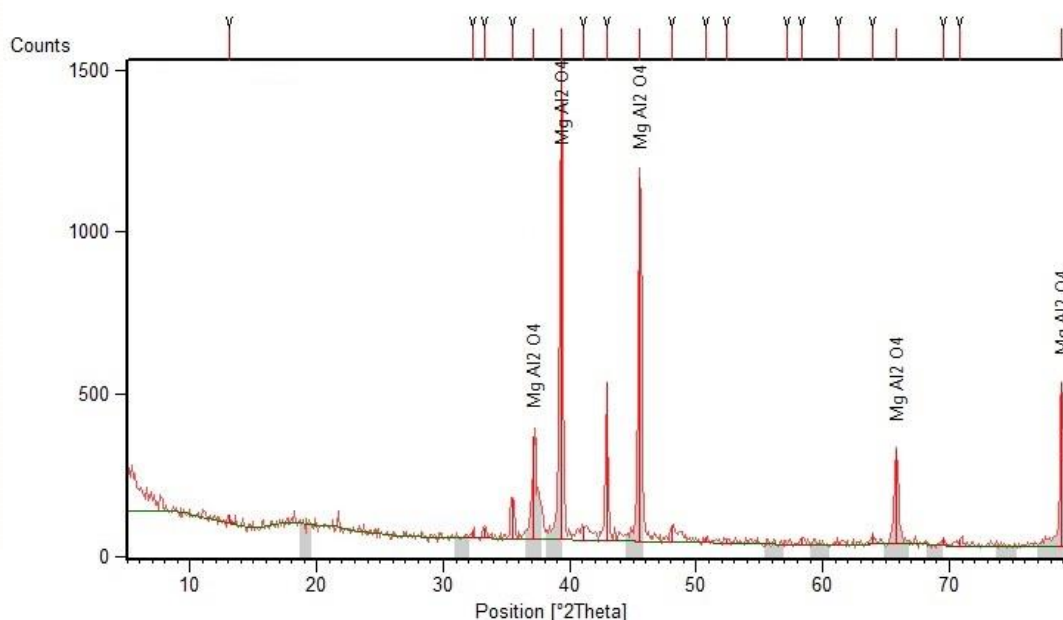
(۳)

$$\Delta G^0 = -29.6 \text{ kJ at } 1000K$$



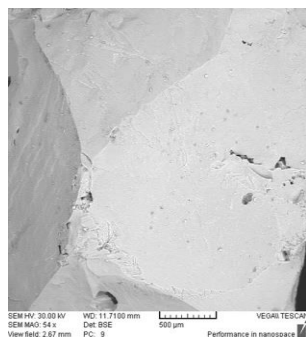


شکل ۱۰- توزیع میکروسختی در فصل مشترک آلومینیم- منیزیم

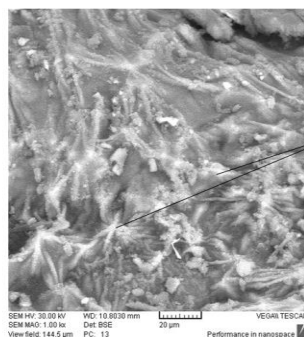


شکل ۱۱- الگوی پراش اشعه‌ی ایکس فصل مشترک آلومینیم- منیزیم

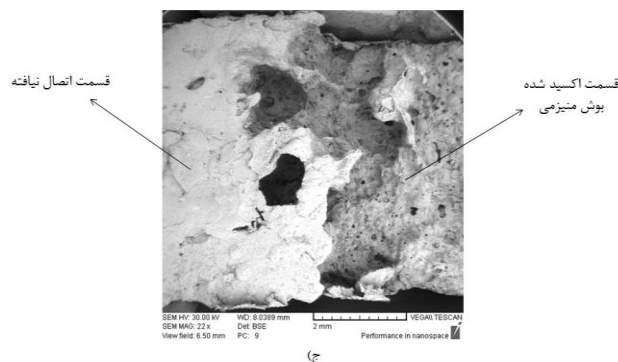
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از فصل مشترک آلومینیم- منیزیم در شکل ۱۲ نشان داده شده است. سطح شکست صاف فصل مشترک در شکل ۱۲ (ب) که دلالت بر ترد بودن شکست و تشکیل اسپینل در فصل مشترک است. همچنین شکل ۱۲ (الف) سطح اکسید شده‌ی منیزی را در فصل مشترک نمونه‌ی ۵ را نشان می‌دهد. تصویر ۱۲ (ج) نیز، دو قسمت اتصال نیافته و اکسید شده را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از (الف) شکست فصل مشترک در نمونه ۶، (ب) فصل مشترک اکسید شده در نمونه ۷، (ج) فصل مشترک اکسید شده و اتصال نیافته در نمونه ۷

نتیجه گیری :

- ۱- تولید جفت فلزی آلومینیم- منیزیم با ریخته‌گری گریز از مرکز امکان‌پذیر بوده و از عوامل تعیین کننده در تولید آن می‌توان به دمای ذوب ریزی و دمای پیش گرم اشاره کرد. البته متغیرهای موثر دیگری نیز وجود دارد.
- ۲- ایجاد اتصال و پر شدن کامل بوش از مذاب بدون پیش گرم کردن امکان‌پذیر نبوده و دمای پیش گرم کردن و سرعت دوران در بازه مشخصی بهترین نتیجه را دارد. ، سرعت دوران بالای ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و دمای بالا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد منجر به اکسیداسیون جامد منیزیم و از بین رفتن کامل استوانه توخالی می‌شود.
- ۳- در تولید جفت فلزی آلومینیم- منیزیم دو نوع اتصال، مکانیکی و متالورژیکی، به تنهایی یا تواما محتمل است. ؛ اتصال مکانیکی در نتیجه‌ی عملکرد نیروهای انقباضی و اتصال متالورژیکی در اثر انحلال جامد و ایجاد لایه‌ی نفوذی- واکنش ایجاد می‌شود.

## منابع

- Bhamji, I., Preuss, M., Moat, R. J., Threadgill, P. L., & Addison, a C. (2012). Linear friction welding of aluminium to magnesium. *Science and Technology of Welding & Joining*, 17(5), 368–374.
- Chen, Y. C., & Nakata, K. (2008). Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys. *Scripta Materialia*, 58(6), 433–436.
- Chirita, G., Soares, D., & Silva, F. S. (2008). Advantages of the centrifugal casting technique for the production of structural components with Al–Si alloys. *Materials & Design*, 29(1), 20–27.
- Emami, S. M., Divandari, M., Arabi, H., & Hajjari, E. (2012). Effect of Melt-to-Solid Insert Volume Ratio on Mg/Al Dissimilar Metals Bonding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(1), 123–130.
- Hajjari, E., Divandari, M., Razavi, S. H., Emami, S. M., & Kamado, S. (2011). Applied Surface Science Estimation of the transient interfacial heat flux between substrate / melt at the initiation of magnesium solidification on aluminum substrates using the lumped capacitance method. *Applied Surface Science*, 257(11), 5077–5082.
- Han, S., & Huh, H. (2012). Evaluation of a cast-joining process of dual-metal crankshafts with nodular cast iron and forged steel for medium speed diesel engines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(1-4), 319–327.
- Joseph Fernandus, M., Senthilkumar, T., Balasubramanian, V., & Rajakumar, S. (2012). Optimizing Diffusion Bonding Parameters to Maximize the Strength of AA6061 Aluminum and AZ61A Magnesium Alloy Joints. *Experimental Techniques*, 1–16.
- Keerthi Prasad, K. S., Murali, M. S., & Mukunda, P. G. (2010). Analysis of fluid flow in centrifugal casting. *Frontiers of Materials Science in China*, 4(1), 103–110. Lloyd, D. J., Lagace, H. P., & Mcleod, A. D. (1990). INTERFACIAL PHENOMENA IN METAL MATRIX COMPOSITES, 359–376.
- Mofid, M. a., Abdollah-zadeh, a., & Malek Ghaini, F. (2012). The effect of water cooling during dissimilar friction stir welding of Al alloy to Mg alloy. *Materials & Design*, 36, 161–167.
- مرتضی مرکبیان اصفهانی ، اسماعیل حجاری، سید رضا علوی زارع ، علی فرزادی. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی شرایط اتصال فلزات غیرهمجنس Al/Mg در فرآیند ریخته‌گری مرکب. دومین همایش بین‌المللی و هفتمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران انجمن علمی ریخته‌گران ایران
- Niu, L., Hojamberdiev, M., & Xu, Y. (2010). Preparation of in situ-formed WC/Fe composite on gray cast iron substrate by a centrifugal casting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(14), 1986–1990.
- Paramsothy, M., Gupta, M., & Srikanth, N. (2008). Processing, Microstructure, and Properties of a Mg/Al Bimetal Macrocomposite. *Journal of Composite Materials*, 42(24), 2567–2584.

Reaction-Web, Fact-Web Programs. <http://www.crct.polymtl.ca/factweb.php>

Thermal properties of metals (2002) ASM ready reference 1st edn. A., Materials Park.

Volder JP (1993), Aluminium 4:11

Xu, G., Luo, A. a., Chen, Y., & Sachdev, A. K. (2014). Interfacial phenomena in magnesium/aluminum bi-metallic castings. *Materials Science and Engineering: A*, 595, 154–158.

Zhang, H., Chen, Y., & Luo, A. a. (2014). A novel aluminum surface treatment for improved bonding in magnesium/aluminum bimetallic castings. *Scripta Materialia*.

**iMat**  
Conference 2014