



بررسی رفتار مذاب آلومینیم و نیروی انقباضی در جفت فلزی آلومینیم - منیزیم ریخته‌گری شده به روش ریخته‌گری گریز از مرکز

مرتضی سروری¹، مهدی دیوانداری^{2*}

1- کارشناسی ارشد، ریخته‌گری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

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

* تهران، صندوق پستی 13114-16846، divandari@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 فروردین 1394

پذیرش: 14 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 03 خرداد 1394

کلید واژگان:

فصل مشترک

نیروهای انقباضی

آلومینیم، منیزیم

اتصال مکانیکی

چکیده

مصرف قطعات منیزیمی و آلومینیمی با هدف کاهش وزن نهایی قطعات در صنایع مختلف به‌طور روز افزون افزایش یافته است. در این پژوهش ریخته‌گری جفت فلزی آلومینیم - منیزیم در حالت ذوب‌ریزی مذاب آلومینیم درون جامد منیزیم به شکل استوانه‌ای توخالی در ابعاد، ارتفاع 35 میلی‌متر و قطر داخلی و خارجی 84 و 76 میلی‌متر، در سرعت‌های دوران 1200 و 1600 دور بر دقیقه، نسبت‌های حجمی مذاب - جامد 0/9، 1/6 و 2/7 و دماهای پیش‌گرم 30، 120، 150 و 200 درجه‌ی سانتی‌گراد به‌وسیله‌ی دستگاه ریخته‌گری گریز از مرکز عمودی انجام شد و فصل مشترک تشکیل شده مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در این حالت تفاوت در میزان انقباض آلومینیم و منیزیم، نسبت به یکدیگر، منجر به ایجاد کوریولیس و هم‌چنین دمای پیش‌گرم جامد است. در این حالت تفاوت در میزان انقباض آلومینیم و منیزیم، نسبت به یکدیگر، منجر به ایجاد اتصال مکانیکی می‌شود. بررسی‌های آنالیز میکروسکوپ الکترونی مجهز به طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) و آنالیز پراش اشعه - ی ایکس (XRD)، آن نشان داد که مقدار آلومینیم در فصل مشترک از سمت منیزیم به طرف آلومینیم طوری افزایش یافته که باعث ایجاد شیب غلظتی و تشکیل ترکیبات بین فلزی Al_3Mg_2 و $Al_{12}Mg_{17}$ و ساختار یوتکتیک، مطابق دیاگرام تعادل، می‌شود.

Melt Behavior and Shrinkage Force Effect of Al Melt in Al/Mg Bimetal Cast via Centrifugal Casting

Morteza Sarvari, Mehdi Divandari*

School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*P.O.B.16846-13114, divandari@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 April 2015
Accepted 04 May 2015
Available Online 24 May 2015

Keywords:
Interface
shrinkage force
mechanical bond
Al
Mg

ABSTRACT

Applications of aluminium and magnesium castings have been increased as a result of increasing demand for the light weight components in various sectors of industry in recent years. In this work an Al/Mg bimetal was prepared by casting Al melt into a cylindrical Mg bush, with 35 mm height and 76 and 84 inner and outer diameter, rotating at 1200 and 1600 revolutions per minute (rpm), 0.9, 1.6 and 2.7 melt-to-solid volume ratio and 30, 120, 150 and 200 °C preheating temperature, respectively. Vertical centrifugal casting process was selected for producing samples. In this process melt is under the effect of centrifugal, coriolis and gravity forces during filling. Difference between shrinkage of Al and Mg led to the formation of mechanical bond in the interface. The results of scanning electron microscope (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD) analysis showed that concentration gradient changes from the Mg to Al side in such a way that three sub layers including Al_3Mg_2 and $Al_{12}Mg_{17}$ intermetallics plus eutectic microstructure ($Al_{12}Mg_{17}$ and δ) were formed, based on aluminium and magnesium phase diagram in the interface.

1- مقدمه

فلزات آلومینیم و منیزیم به‌عنوان سبک‌ترین فلزات صنعتی شناخته می‌شوند، که منیزیم با چگالی 1/7 گرم بر سانتی‌متر مکعب حدود 30 درصد سبک‌تر از آلومینیم است [1]. تولید قطعات ریختگی سبک وزن آلومینیمی و منیزیمی، به دلیل کاهش مصرف سوخت در صنعت حمل‌ونقل، به‌طور روز افزون مورد توجه قرار گرفته است [2]. آلومینیم و منیزیم هریک خصوصیات منحصر به

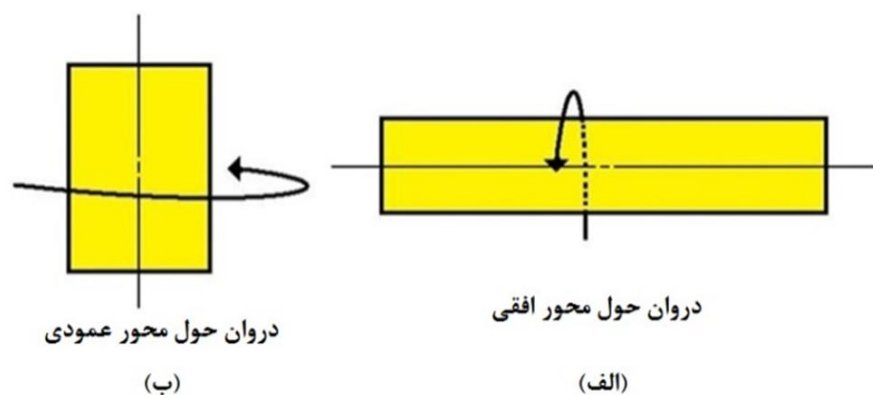
فردی دارند، که مهندسی پیشرفته نیازمند خواص دو فلز در یک قطعه است. لازمه‌ی رفع این نیاز، تولید قطعات جفت فلزی با فرآیندهای جوشکاری یا ریخته‌گری است.

روش‌های جوشکاری حالت جامد [3] و ذوبی [4] برای اتصال جفت‌های غیرهمجنس آلومینیم و منیزیم استفاده شده است. هزینه‌ی بالای فرآیندهای جوشکاری و هم‌چنین محدودیت در تولید قطعات با شکل‌های پیچیده،

Please cite this article using:

M. Sarvari, M. Divandari, Melt Behavior and Shrinkage Force Effect of Al Melt in Al/Mg Bimetal Cast via Centrifugal Casting, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 131-138, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 الف) ریخته گری گریز از مرکز افقی، ب) ریخته گری گریز از مرکز عمودی

جدول 2 خصوصیات فیزیکی و حرارتی مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق [12،11].

منیزیم	آلومینیم	خصوصیات ماده
1738	2698	چگالی ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1025	900	گرمای ویژه ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
$1/78 \times 10^6$	$2/42 \times 10^6$	گرمای ویژه حجمی ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)
370×10^3	396×10^3	گرمای نهان ذوب ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
64×10^7	106×10^7	گرمای نهان ذوب حجمی ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$)
156	227	هدایت حرارتی ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
650	660	دمای ذوب ($^{\circ}\text{C}$)

آلومینیم مذاب در دمای 700 درجه سانتی گراد از راهگاه نشان داده شده در شکل 2 درون دستگاه گریز از مرکز ریخته گری شد. همان طور که در شکل 2 مشاهده می شود، دستگاه مجهز به سیستم گرمایشی در اطراف قالب جهت پیش گرم جامد است. به منظور اندازه گیری دمای پیش گرم، ترموکوپل در نزدیک ترین محل به قالب قرار گرفته است. نیروی گریز از مرکز حاصل از حرکت چرخشی و مولفه های حاصل از آن می تواند به فصل مشترک مناسب تری در مقایسه با ریخته گری معمولی منجر شود.

مذاب آلومینیم درون جامد پیش گرم شده و در حال دوران ریخته گری شد. سطوح قسمت جامد با سنباده های سیلیکون کاربید تا شماره 1200 سنباده زنی شد و در نهایت سطوح با محلول استون چربی زدایی شدند.

نمونه های اتصال یافته از وسط نصف و موازی با مقطع برش، به قسمت های کوچک تر تقسیم شدند. مقطع عرضی تا سنباده 2500 سنباده زنی و در نهایت با آلومینای 1 میکرونی پولیش شد. نمونه ها برای فرآیند متالوگرافی با روش های استاندارد آماده سازی شدند. ریزساختار نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ نوری ساخت ژاپن و میکروسکوپ الکترونی روبشی ساخت چکوسلواکی و مجهز به دیتکتور طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس، بررسی شدند.

3- نتایج و بحث

3-1- رفتار مذاب

جریان فلز مذاب در ریخته گری گریز از مرکز به دلیل نیروهای وارد بر مذاب در حین کاهش درجه حرارت مذاب نسبت به حالت ریخته گری عادی پیچیده تر است. افت درجه حرارت منجر به افزایش چگالی و تغییر در رفتار نیروهای وارد بر مذاب در حین ریخته گری می شود. در حالت ریخته گری گریز از مرکز عمودی، مذاب به محض ریخته گری درون قالب، با قالب هم سرعت می شود. در این حالت با توجه به برآیند حاصل از نیروی گریز از مرکز و نیروی گرانشی، مذاب در حین پر کردن جامد، تمایل به تشکیل شکل

کاربرد این فرآیندها را با محدودیت مواجه می سازد.

در روش ریخته گری مرکب یک فلز در حالت مذاب در اطراف یا درون فلز جامد دیگری ریخته گری می شود [5]. ریخته گری تحت فشار [6] و ریخته گری ثقلی [7] از روش های ریخته گری متداول برای تولید جفت فلزی آلومینیم - منیزیم به شمار می روند. به عنوان مثال، بلوک سیلندر آلومینیم - منیزیم متعلق به خودرو "بی ام و"، جفت فلزی تولید شده به روش ریخته گری مرکب به وسیله ریخته گری تحت فشار است. در این جفت فلزی، آلومینیم به صورت جامد در داخل قالب قرار گرفته و مذاب منیزیم در اطراف آن ریخته گری می شود [8].

میل به تشکیل ترکیبات بین فلزی، در آلومینیم و منیزیم، و همچنین تفاوت در ضریب انبساط حرارتی، منجر به چالش مهمی در ایجاد اتصال متالورژیکی پیوسته در جفت فلزی آلومینیم - منیزیم شده است. اتصال انقباضی یا قفل مکانیکی در اثر تفاوت در میزان انقباض حاصل از انجماد دو فلز ایجاد می شود. در روش ریخته گری تحت فشار، به دلیل سرعت بالای سرد شدن، ممکن است در جفت فلزی های تولیدی، فقط اتصال مکانیکی ایجاد شود [6]. در تولید بلوک سیلندر آلومینیم - چدن [9] و آلومینیم - منیزیم [8]، با ایجاد زبری سطحی کافی و همچنین تفاوت در نیروی های انقباضی ایجاد اتصال مکانیکی میسر شده است.

هدف از این تحقیق بررسی تولید جفت فلزی آلومینیم - منیزیم به روش ریخته گری گریز از مرکز است. فرآیند ریخته گری گریز از مرکز در دو حالت افقی و عمودی انجام می شود (شکل 1) که در این پژوهش از حالت ریخته گری گریز از مرکز عمودی استفاده شد. ویژگی های ریخته گری گریز از مرکز؛ نحوه حرکت سیال، شرایط انتقال حرارت و سرعت انجماد است. نحوه حرکت سیال در این نوع ریخته گری با حالت ثقلی متفاوت است. در این روش آشفته گی جریان سیال در کنار قالب بیشتر است. زمانی که مذاب به دیواره برخورد می کند و اولین ذرات جامد ایجاد می شوند این ذرات دوباره به مذاب برمی گردند و تعداد محل های انجماد را افزایش می دهند که به این ترتیب مثل تأثیر ارتعاش باعث ریزدانه شدن ساختار می شود [10]. متغیرهای موثر در فرآیند تولید جفت فلزی با این روش؛ دمای ذوب ریزی، دمای پیش گرم، نسبت حجمی مذاب - جامد و سرعت دوران هستند.

2- روش پژوهش

بوش های منیزیمی تراشکاری شده از شمش های منیزیم خالص تجاری با ارتفاع و ضخامت 35 و 4 میلی متر (قطر خارجی 84 و داخلی 76 میلی متر) و آلومینیم خالص تجاری در این تحقیق استفاده شد. ترکیب شیمیایی منیزیم و آلومینیم در جدول 1 ارائه شده است. همچنین خصوصیات فیزیکی دو فلز آلومینیم و منیزیم در جدول 2 مشاهده می شود.

جدول 1 ترکیب شیمیایی مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق

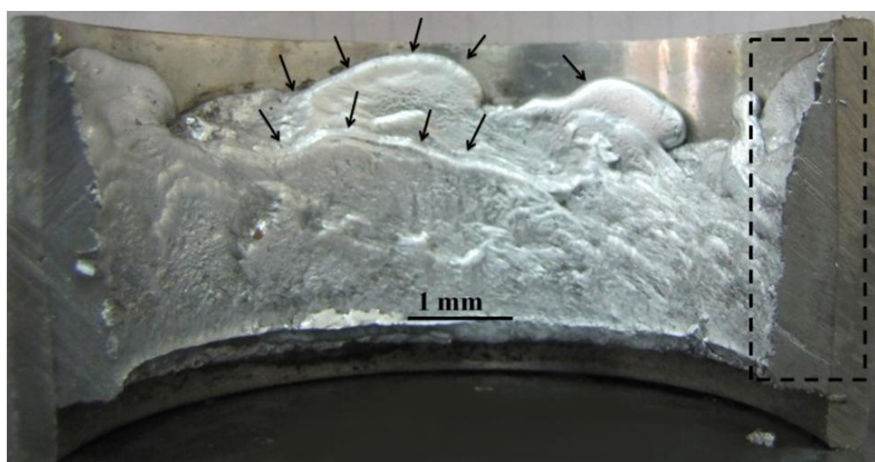
ماده	شمش آلومینیم	شمش منیزیم
آلومینیم	99/5	0/1
منیزیم	0/027	99/32
سیلیسیم	0/08	0/02
آهن	0/064	0
روی	0	0/093
مس	0	0/036

برآیند نیرو شامل دو عبارت، نیروی گرانشی و برآیند نیروی گریز از مرکز و نیروی کوریولیس، است. شکل 3 رفتار مذاب با توجه به نیروی گرانشی و برآیند دو نیرو را نشان می‌دهد. در قسمت پایینی قالب (A) نیروی گرانشی بر برآیند دو نیرو غلبه دارد، برآیند نیروی وارد بر مذاب به سمت پایین بوده و منجر به جمع شدن مذاب در قسمت پایینی قالب می‌شود، ولی در ناحیه‌ی (B) برآیند دو نیرو ذکر شده بر نیروی گرانشی غلبه کرده و برآیند نیروی حاصله به سمت بالا بوده و مذاب بالا می‌آید.

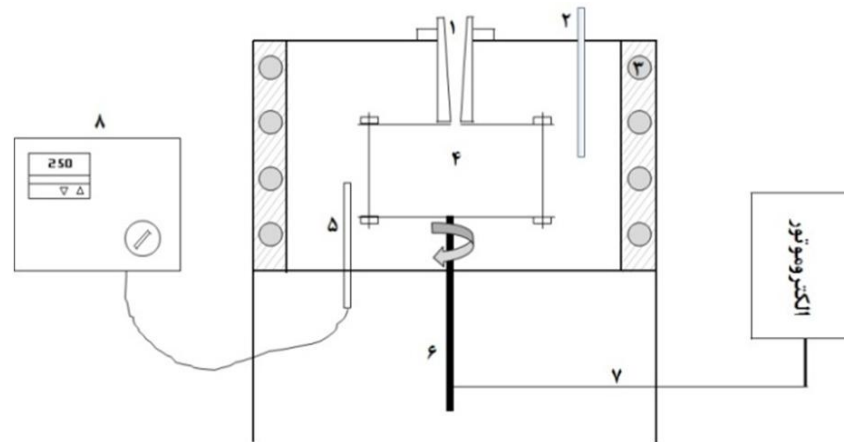
شکل 5 تصویر ماکروسکوپی نمونه‌ی ریخته‌گری شده را نشان می‌دهد. سهمی بودن رفتار مذاب در پر کردن جامد و همچنین نحوه‌ی بالا آمدن مذاب در شکل 5 مشخص شده و طرح‌واره‌ی آن در شکل 6 مشاهده می‌شود. برآیند نیروهای گریز از مرکز و کوریولیس علاوه بر کمک به بالا آمدن مذاب در داخل جامد، می‌تواند منجر به پارگی لایه‌های اکسید سطحی مذاب شود. علاوه بر نقش سرعت دوران و نیروی گرانشی، در پر کردن قالب (جامد منیزیمی)، دمای پیش گرم نیز نقش اساسی دارد. به‌طوری که در اولین تماس مذاب با سطح جامد سردتر، منجر به انجماد بخشی از مذاب در سطح پایینی قالب می‌شود [15]، انجماد مذاب در مرحله‌ی اول تماس منجر به افزایش چگالی موضعی شده، که در این حالت نیروی گرانشی بر برآیند دو نیرو غلبه کرده و منجر به جمع شدن آلومینیم در سطح پایین قالب در حال دوران می‌شود. شکل 7 تصویر ماکروسکوپی نمونه‌ی ریخته‌گری شده در سرعت دوران 1200 دور بر دقیقه، دمای پیش گرم 30 درجه‌ی سانتی‌گراد و نسبت حجمی 1/6 را نشان می‌دهد. بنابراین پیش گرم بوش منیزیمی برای بهبود ترشوندگی و پر شدن کامل توسط مذاب، امر ضروری است.

بعلاوه می‌توان به نقش فیلم اکسیدی سطحی نیز اشاره کرد. سطح جبهه‌ی حرکت مذاب، در صورت عدم حضور فیلم اکسید سطحی، هموار است. اما باید توجه داشت که لایه‌های فیلم سطحی کامل و یکدست نبوده و می‌توانند حاوی آخال‌ها و عیوب ساختاری باشند. با این فرض حضور آخال‌ها در فیلم‌های اکسیدی، می‌تواند به منزله‌ی ناپیوستگی موضعی عمل کرده و محل‌های مناسبی برای پارگی لایه‌ی اکسید سطحی تحت نیروی گریز از مرکز به شمار رود [16, 17] در نتیجه منجر به بیرون زدگی مذاب از محل پارگی لایه‌ی اکسیدی می‌شود، که به‌طور طرح‌واره در شکل 8 نشان داده شده است.

همچنین باید توجه کرد که به محض تماس مذاب آلومینیم با جامد منیزیم، در محل فصل مشترک، هسته‌های انجمادی میل به تشکیل دارند. با شروع و ادامه انتقال حرارت دانه‌های هم‌محور اولیه در سطح جامد می‌توانند تشکیل شوند. در ادامه با تشکیل هسته‌های انجمادی بیشتر حرکت سیال به دلیل افزایش ویسکوزیته دچار کندی می‌شود. حاصل مجموعه نیروهای وارده



شکل 5 نحوه‌ی رفتار مذاب آلومینیم در پر کردن قالب (جامد منیزیم)، پیکان‌ها و منطقه‌ی مشخص شده، نشان‌دهنده‌ی رفتار مذاب است.



شکل 2 طرح‌واره‌ی دستگاه ریخته‌گری گریز از مرکز عمودی؛ 1- راهگاه (محل ورود مذاب) 2- محل ورود گاز محافظ 3- سیستم گرمایشی (المنت) 4- محل قرارگیری بوش 5- دماسنج (ترموکوپل) 6- شفت 7- تسمه‌ی انتقال نیرو 8- اینورتر

سهمی [13] دارد. این موضوع به صورت طرح‌واره در شکل 3 نشان داده شده است.

با فرض یک المان کوچک بر روی مذاب، نیروهای وارد بر مذاب را می‌توان به‌صورت شکل 4 نشان داد. نیروهای گریز از مرکز، کوریولیس و گرانشی بر این نقطه از مذاب وارد می‌شوند [14].

نیروهای وارد بر نقطه‌ی مفروض را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$F_{ce} = mr\omega^2 : \text{نیروی گریز از مرکز}$$

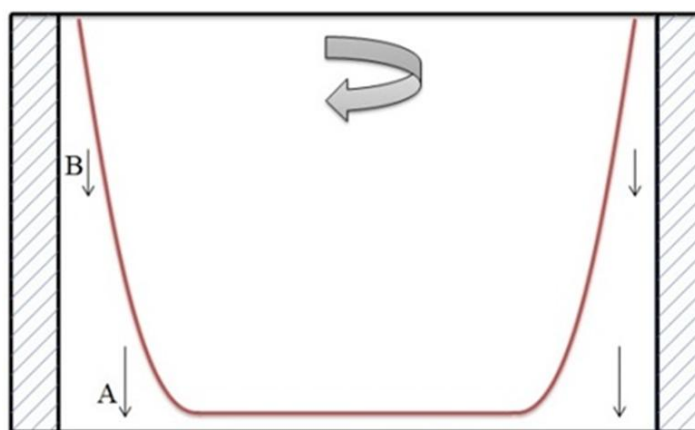
$$F_{co} = -2m\omega^2 r : \text{نیروی کوریولیس}$$

$$F_g = mg : \text{نیروی گرانشی}$$

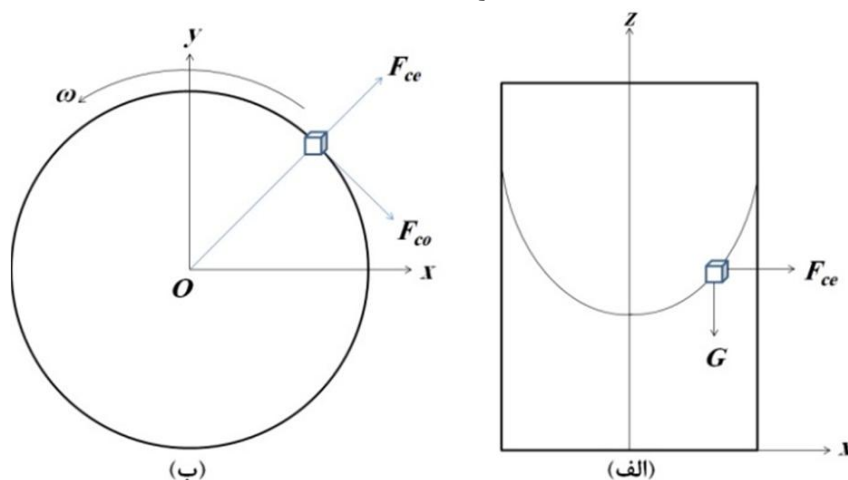
برآیند نیروهای حاصل را می‌توان به‌صورت F_n نوشت:

$$F_n = mg + mr\omega^2 - 2m\omega^2 r \quad (1)$$

$$F_n = mg - mr\omega^2 \quad (2)$$



شکل 3 نحوه‌ی بالا آمدن مذاب در داخل بوش منیزیم، در ناحیه‌ی A نیروی گرانشی بیشتر از ناحیه‌ی B است، در منطقه‌ی B نیروی گریز از مرکز غلبه کرده و مذاب بالا رفته است.



شکل 4 نیروهای وارد بر مذاب در ریخته‌گری گریز از مرکز عمودی، الف) F_{ce} نیروی گریز از مرکز و G نیروی گرانشی، ب) F_{ce} نیروی گریز از مرکز و F_{co} نیروی کوریولیس.

شکل را ایجاد کند.

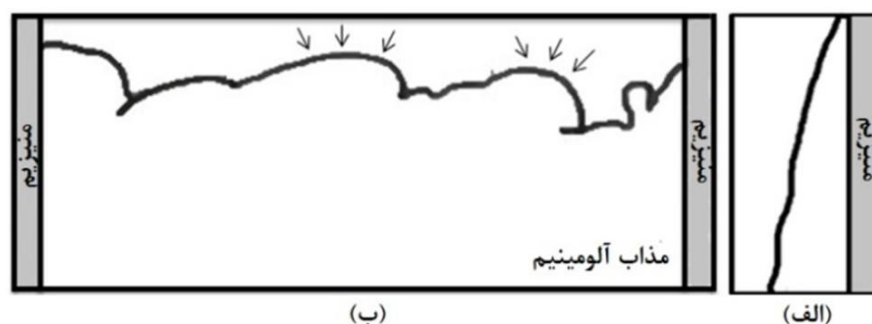
3-2- نقش نیروهای انجمادی - انقباضی در تشکیل فصل مشترک

با توجه به دمای پیش گرم جامد و محتوای حرارتی مذاب امکان ایجاد 3 حالت در فصل مشترک وجود دارد. در حالتی که محتوای حرارتی خیلی کم باشد، در این صورت اتصال متالورژیکی در فصل مشترک ایجاد نمی‌شود، شکل 9 (الف)، در صورت مناسب بودن محتوای حرارتی فلز مذاب انحلال جامد توسط مذاب از فصل مشترک شروع شده، که در این صورت اتصال متالورژیکی در فصل مشترک تشکیل می‌شود، شکل 9 (ب)، بدیهی است چنانچه محتوای حرارتی بالا باشد ممکن است ذوب و انحلال جامد اتفاق بیافتد، شکل 9 (ج) [17].

نیروی انقباضی حاصل از انجماد فلز مذاب، از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در نوع اتصال ایجاد شده در فصل مشترک است. ضریب انبساط حرارتی فلزات آلومینیم و منیزیم به ترتیب برابر با $24 \times 10^{-6} K^{-1}$ و $25.5 \times 10^{-6} K^{-1}$ گزارش شده است [12, 11] که تفاوت در مقدار ضریب انبساط حرارتی آلومینیم و منیزیم از عوامل موثر در تشکیل اتصال مکانیکی است. بر همین اساس، میزان انقباض فلزات آلومینیم و منیزیم، از دمای انجماد تا دمای محیط به ترتیب حدود 1/4% و 1/6% خواهد بود. بیش‌تر بودن نیروی انقباضی مذاب منیزیم نسبت به آلومینیم منجر به ایجاد اتصال انقباضی در فصل مشترک دو فلز می‌شود. همین موضوع باعث شده است که در صنعت تولید خودرو بتوان بلوک سیلندر آلومینیم - منیزیم به روش ریخته‌گری تحت فشار تولید کرد [8]. بایستی توجه داشت که سرعت سرد کردن بالا، در این مورد، منجر به عدم تشکیل اتصال متالورژیکی در فصل مشترک شده، ولی اتصال محکم مکانیکی در فصل مشترک با توجه به نیروی انقباضی ایجاد می‌شود. بنابراین عملاً شرایط موجود منطبق بر حالت (الف) در شکل 9 است. این موضوع اخیراً مورد توجه مراکز تحقیقاتی مرتبط با تولید قطعات موتور خودرو قرار گرفته است [6].

با توجه به تصویر توپوگرافی سطحی منیزیم توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (شکل 10)، سطح جامد هموار نبوده و دارای پستی و بلندی است. شکل 11 (الف)، بیانگر این مطلب، به صورت تصویری است. با فرض عدم ذوب‌شدگی سطحی جامد توسط مذاب، وقتی که مذاب در تماس با سطح جامد قرار می‌گیرد (شکل 11 (ب))، مذاب در ناهمواری‌های سطح جامد رخنه و دخول می‌کند. با توجه به زیاد بودن انقباض منیزیم نسبت به آلومینیم و دخول مذاب در ناهمواری‌های سطح، قفل مکانیکی در فصل مشترک آلومینیم - منیزیم ایجاد می‌شود، شکل 11 (ج). شکل 11 طرح‌واره‌ی روند تشکیل اتصال مکانیکی و نقش نیروهای انقباضی در تشکیل آن را نشان می‌دهد. البته در این تصویر کل ناهمواری سطحی مقعر به صورت کاملاً پر رسم شده است که در بعضی از موارد ممکن است به دلیل حضور نیروهای تنشی سطحی عمق ناهمواری‌های مزبور توسط مذاب تر نشود.

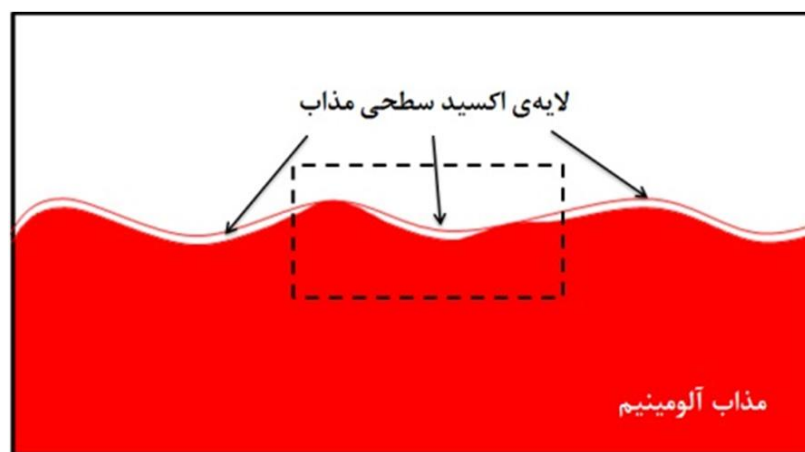
با توجه به شکل 12 برآیند نیروهای انقباضی علاوه بر ایجاد اتصال مکانیکی، منجر به افزایش استحکام اتصال در منطقه‌ی پیوسته‌ی متالورژیکی در فصل مشترک می‌شود به‌طوری که تشکیل اتصال در فصل مشترک نیاز اساسی در یک ساختار ریخته‌گری مرکب است [5]. اتصال مکانیکی ایجاد شده در نمونه‌ی ریخته‌گری شده در سرعت دوران 1600 دور بر دقیقه و دمای پیش گرم 120 درجه‌ی سانتی‌گراد و نسبت حجمی 2/7، در شکل 13 نشان داده شده است. در این حالت بدون ایجاد فصل مشترک متالورژیکی، بعد از برش بوش جفت فلزی، دو فلزی از یکدیگر جدا نشده‌اند.



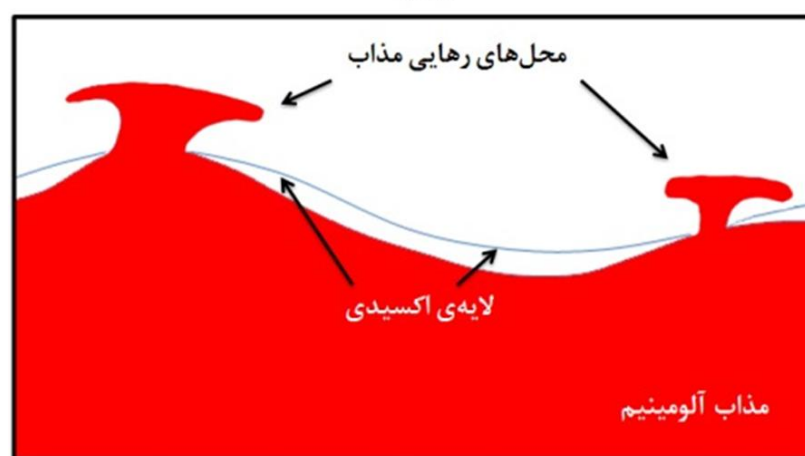
شکل 6 الف) طرح‌واره‌ی رفتار مذاب در پر کردن جامد، الف) سهمی بودن رفتار مذاب در پر کردن جامد، ب) نحوه‌ی پیشروی جبهه‌ی مذاب.



شکل 7 نمونه‌ی بدون پیش گرم، جمع شدن آلومینیم در قسمت پایین جامد



(الف)

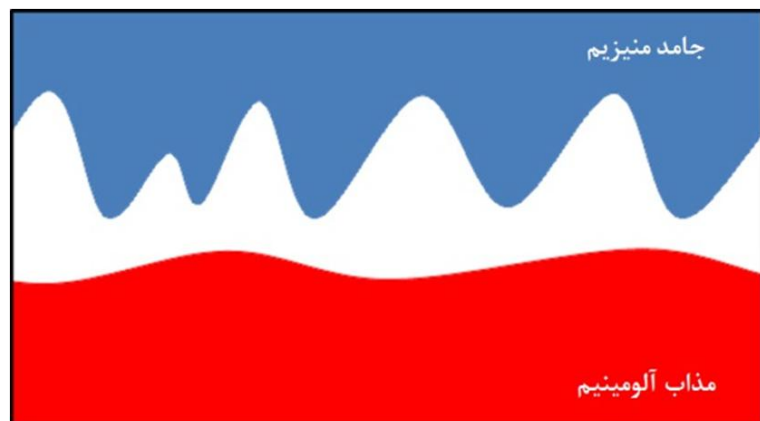


(ب)

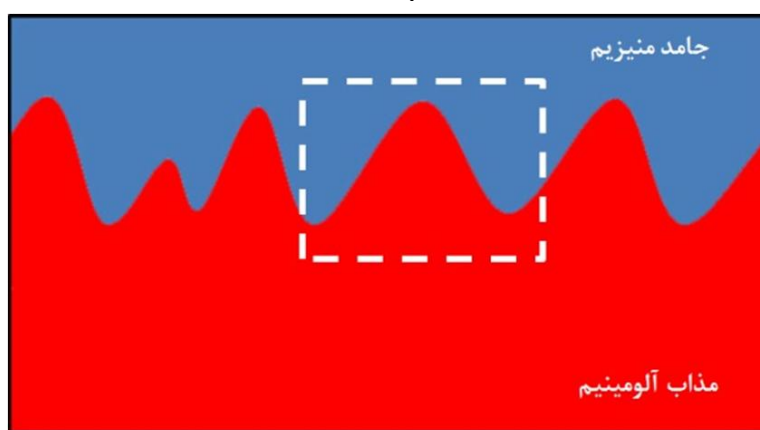
شکل 8 طرح‌واره‌ی پیشروی جبهه‌ی مذاب و رهایی مذاب از محل‌های گسستگی لایه‌ی اکسید سطحی مذاب آلومینیم، الف) حضور لایه‌ی اکسیدی بر روی سطح مذاب آلومینیم، ب) بزرگنمایی محل مشخص شده در قسمت (الف)

بر مذاب شامل نیروهای ناشی از حرکت دورانی قالب، به‌اضافه شرایط انجمادی و تشکیل هسته‌های جامد و نیروهای گرانشی ناشی از تفاوت جامد و مذاب و همچنین شرایط فیلم اکسیدی جامد سطحی، منجر به تشکیل جریان سهمی در جلو جبهه مذاب می‌شود. مجموعه‌ی این نیروها به‌عنوان مانع در جهت پر شدن قالب عمل می‌کنند و به همین دلیل لازم است که برآیند نیروهای وارد بر مذاب طوری باشد که مذاب بتواند تا سطح بالای استوانه توخالی جامد بالا آمده و شکل مناسب برای تولید جفت فلزی رینگی

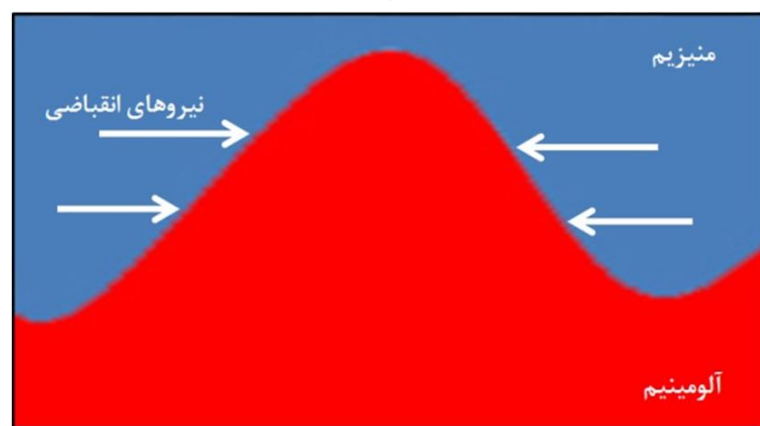
کننده شرایط حلالیت است. به همین دلیل دیده می‌شود که اگر فلز مذاب با فلز جامد اختلاف قابل توجهی در نقطه ذوب داشته باشد، مانند آلومینیم و آهن، باز هم انحلال جامد در مذاب محتمل است که البته در مورد این دو فلز منجر به تشکیل سریع ترکیبات بین فلزی می‌شود.



(الف)

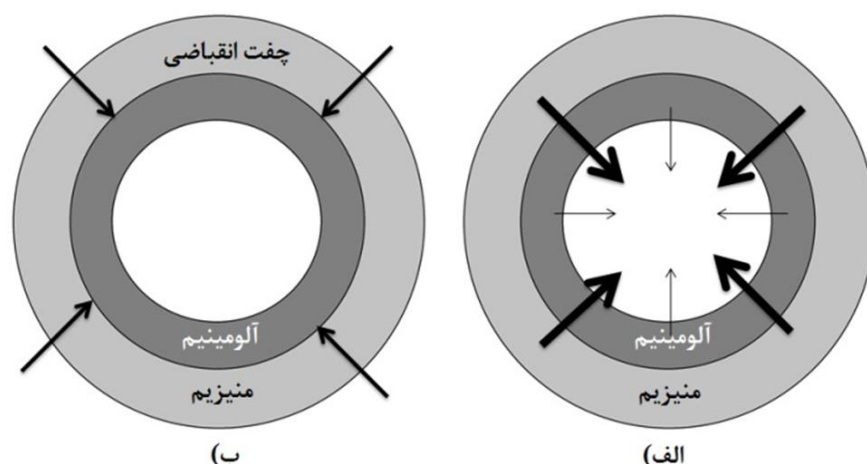


(ب)

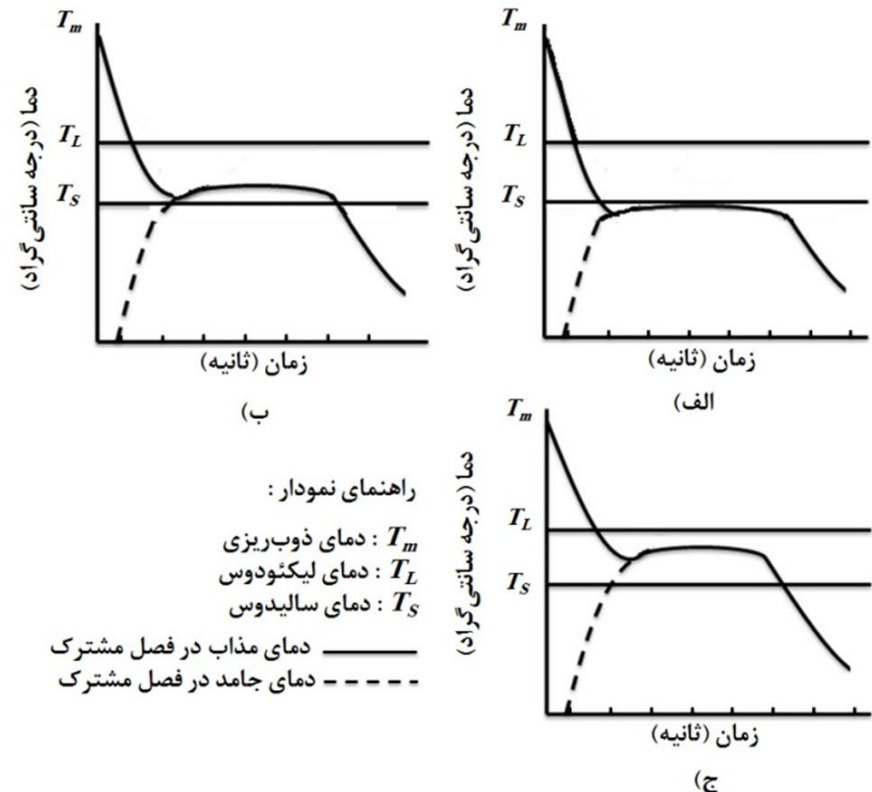


(ج)

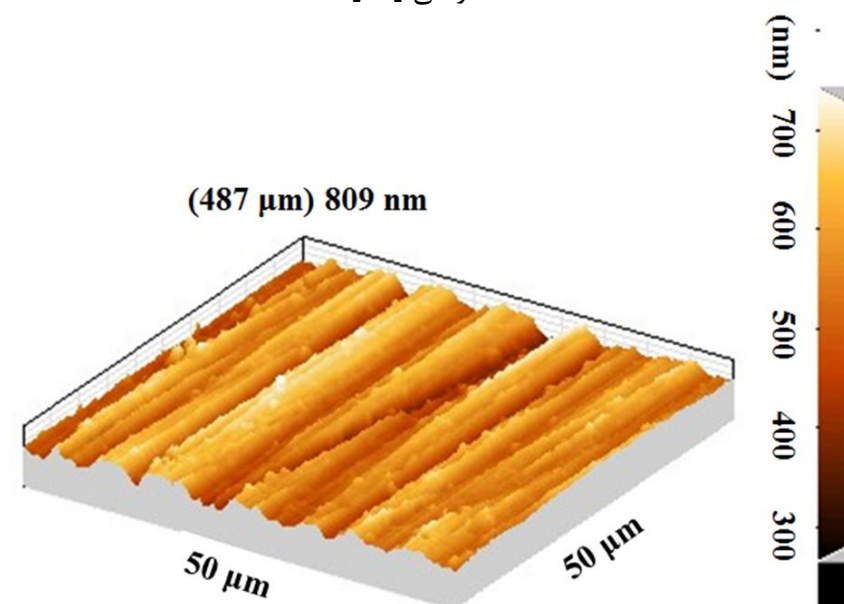
شکل 11 نقش نیروهای انقباضی موجود در اتصال دوتایی آلومینیم-منیزیم، الف) سطح ناهموار جامد، ب) پیشروی مذاب آلومینیم درون ناهمواری‌های سطح جامد آلومینیم، ج) بزرگنمایی قسمت نشان داده شده در قسمت (ب)، انقباض منیزیم و گیر افتادن آلومینیم در بین ناهمواری‌های سطحی.



شکل 12 نیروهای انقباضی موجود در اتصال دوتایی آلومینیم-منیزیم، الف) نیروهای انقباضی مذاب منیزیم بیشتر از آلومینیم، ب) برآیند نیروهای انقباضی منجر به افزایش استحکام و ایجاد اتصال مکانیکی شده است.



شکل 9 شرایط تماس جامد/مذاب مربوط به حالت‌های مختلف دما در فصل مشترک. الف) دمای پایین و زمان کوتاه ب) دمای متوسط و زمان متوسط ج) دمای بالا و زمان طولانی [18].

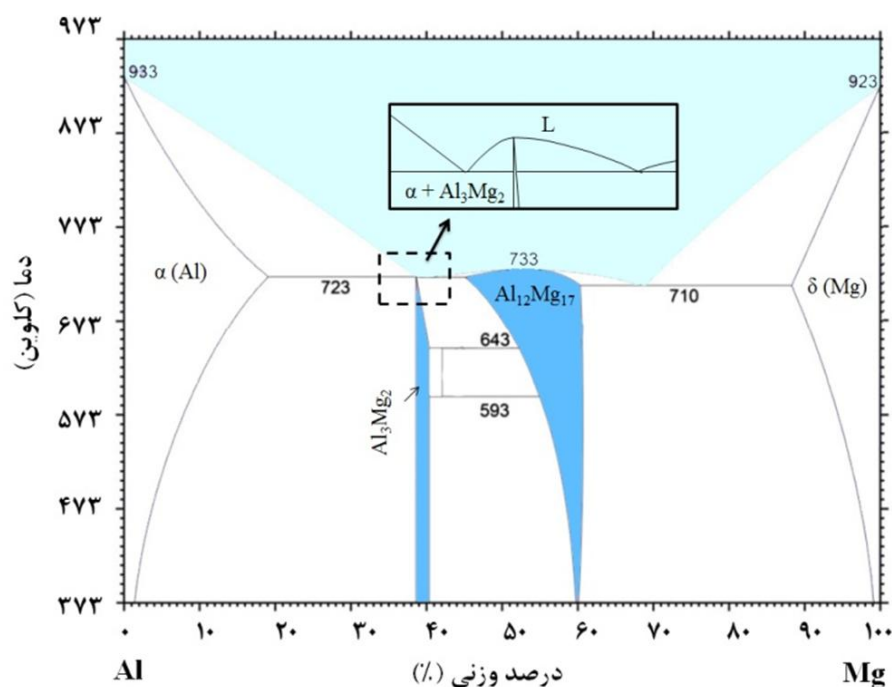


شکل 10 تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی از سطح منیزیم

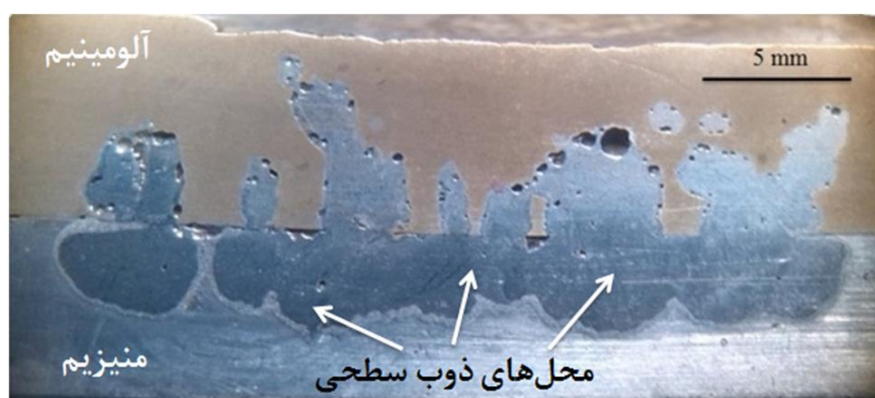
3-3- بررسی ریزساختاری فصل مشترک

مشکل اساسی در اتصال فلزات آلومینیم-منیزیم تشکیل فازهای بین فلزی ترد و ساختار یوتکتیک در فصل مشترک است، که منجر به کاهش چقرمگی اتصال می‌شود. دمای پایین واکنش یوتکتیک آلومینیم-منیزیم نسبت به دمای ذوب دو فلز، منجر به تشکیل فازهای بین فلزی اجتناب‌ناپذیر در فصل مشترک در هر نوع فرآیند اتصال می‌شود [19,20]. دلیل عمده تشکیل ترکیبات بین فلزی در روش‌های مختلف اتصال و جوشکاری بر اساس نفوذ اتم‌های آلومینیم و منیزیم [21] و یا ایجاد ذوب سطحی و انحلال جامد در مذاب است [22].

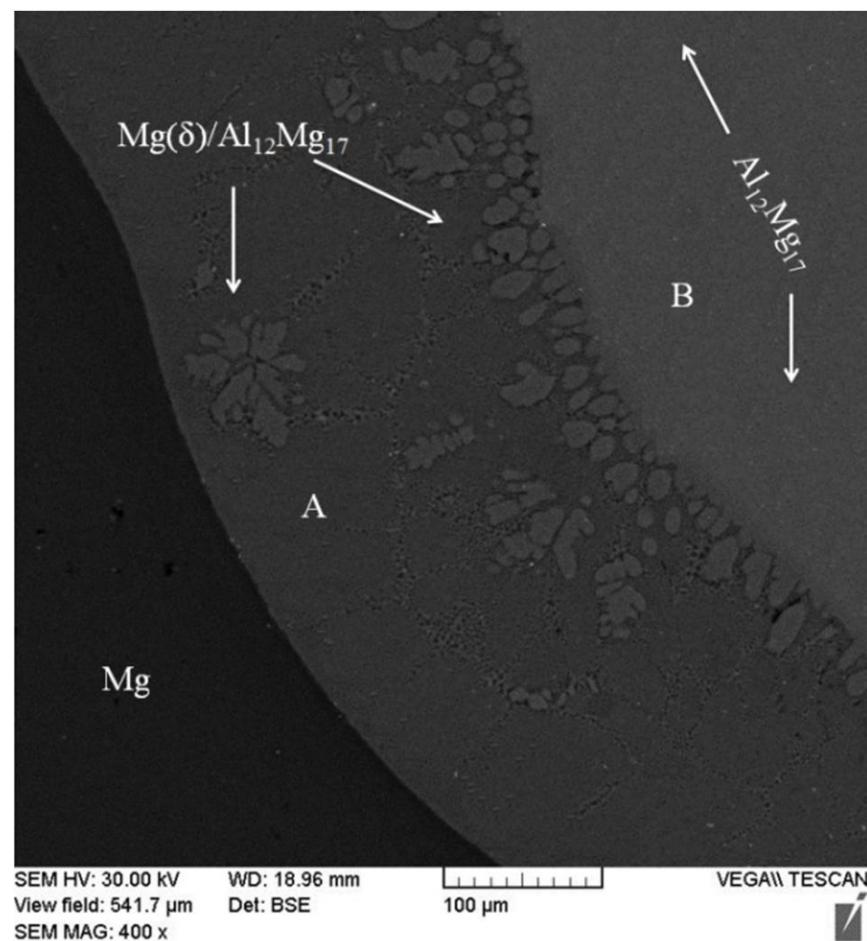
روند تشکیل فصل مشترک متالورژیکی بر مبنای ذوب سطحی جامد است که ذوب سطحی ایجاد شده در جامد منیزیمی در شکل 14 کاملاً مشهود است. محتوای حرارتی مذاب و پیش‌گرم جامد منجر به متمرکز شدن حرارت در فصل مشترک مذاب جامد شده و انحلال اتم‌های فاز جامد در مذاب از نقاط برجسته سطح شروع می‌شود. انحلال جامد در مذاب، از نقاط برجسته به سمت مرکز جامد تداوم یافته و این نکته فقط بستگی به مقدار محتوای حرارتی مذاب ندارد بلکه دیاگرام فازی دو فلز یا دو آلیاژ تعیین



شکل 14 نمودار دو فاز آلومینیم - منیزیم



شکل 15 تصویر ماکروسکوپی از فصل مشترک جفت فلزی آلومینیم - منیزیم

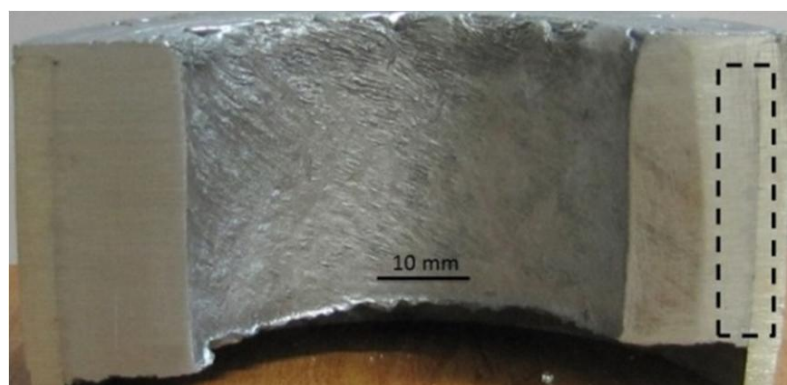


شکل 16 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک در سمت منیزیم

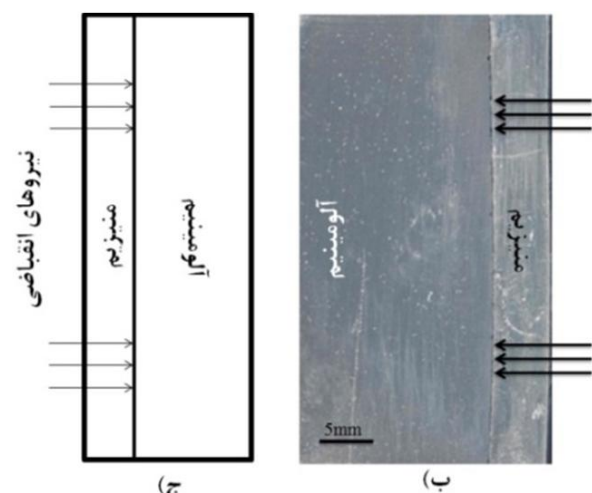
بین این دو ساختار تشکیل می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

- رفتار مذاب آلومینیم در پر کردن جامد منیزیمی تابع نیروهای گریز از مرکز، گرانشی، کوریلیس و هم‌چنین دمای پیش‌گرم و شرایط تشکیل هسته‌های جامد معلق و هم‌چنین فیلم‌های سطحی



(الف)



(ج)

(ب)

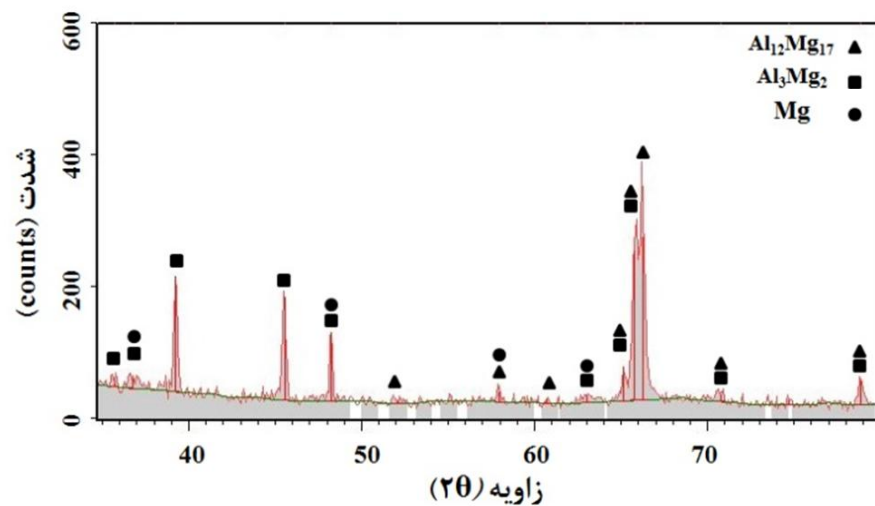
شکل 13 (الف) تصویر ماکروسکوپی از اتصال مکانیکی بین آلومینیم و منیزیم، (ب) طرح‌واره نیروهای وارد بر فصل مشترک و تشکیل اتصال مکانیکی.

در مورد دو فلزی که با هم انحلال کامل داشته باشند فاز تشکیل شده ناشی از انحلال محلول جامد خواهد بود. بر طبق نمودار فازی آلومینیم - منیزیم، که در شکل 14 نشان داده شده است، طی واکنش مناطق غنی از آلومینیم و منیزیم با یکدیگر، ترکیبات بین فلزی Al_3Mg_2 و $Al_{12}Mg_{17}$ تشکیل می‌شوند. میزان منیزیم حل شده در مذاب آلومینیم و دمای فصل مشترک تعیین کننده نوع ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک است. به طوری که طی واکنش یوتکتیک $L \rightarrow \delta (Mg) + Al_{12}Mg_{17}$ در دمای 437 درجه سانتی‌گراد، ساختار یوتکتیک در سمت منیزیم تشکیل می‌شود. واکنش یوتکتیک دیگر در دمای 450 درجه سانتی‌گراد و طی واکنش $L \rightarrow \alpha (Al) + Al_3Mg_2$ اتفاق می‌افتد [23].

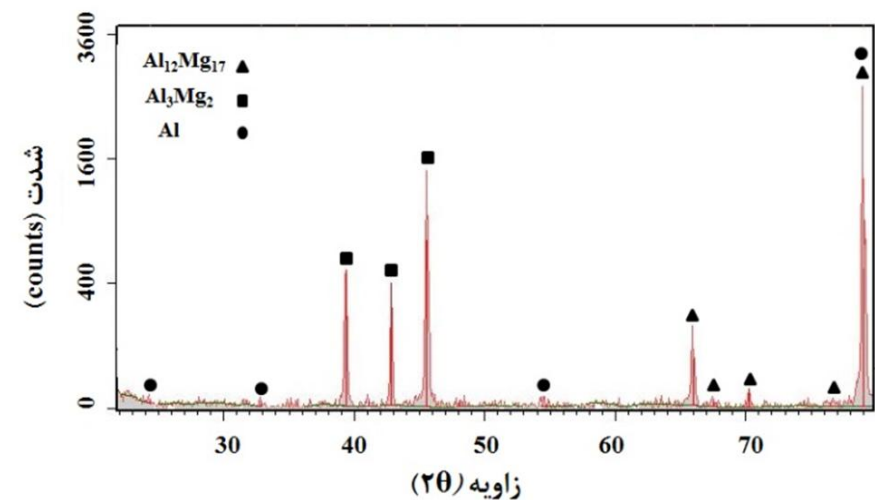
مقدار جامدی که در مذاب حل می‌شود با توجه به نمودار دو فاز آلومینیم - منیزیم، تعیین کننده نوع فازهای تشکیل شده در فصل مشترک است. شکل 15 تصویر ماکروسکوپی نمونه ریخته‌گری شده در سرعت دوران 1200 دور بر دقیقه، دمای پیش‌گرم 200 درجه سانتی‌گراد و نسبت حجمی 0/9 را نشان می‌دهد، که ذوب‌شدگی در سمت منیزیم اتفاق افتاده است. با توجه به تصویر میکروسکوپ الکترونی در شکل 16 فقط ساختار یوتکتیکی $\delta (Mg) + Al_{12}Mg_{17}$ در فصل مشترک و در سمت منیزیم تشکیل می‌شود. هم‌چنین در شکل 17 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ترکیب بین فلزی در سمت آلومینیم را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نشان می‌دهد، (شکل 18)، که در فصل مشترک از سمت منیزیم به سمت آلومینیم، مقدار آلومینیم در فصل مشترک افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده‌ی شیب غلظتی در فصل مشترک است. وجود شیب غلظتی در فصل مشترک منجر به تشکیل ترکیبات بین فلزی متفاوت در فصل مشترک می‌شود.

نتایج حاصل از آنالیز پراش اشعه ایکس (شکل 19 و 20) نیز تایید کننده‌ی تشکیل ترکیبات فلزی Al_3Mg_2 و $Al_{12}Mg_{17}$ در فصل مشترک است. ساختار یوتکتیک $\delta (Mg) + Al_{12}Mg_{17}$ (محلول جامد منیزیم) در سمت منیزیم و ترکیب بین فلزی Al_3Mg_2 در سمت آلومینیم و ترکیب بین فلزی $Al_{12}Mg_{17}$



شکل ۱۹ نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس از فصل مشترک



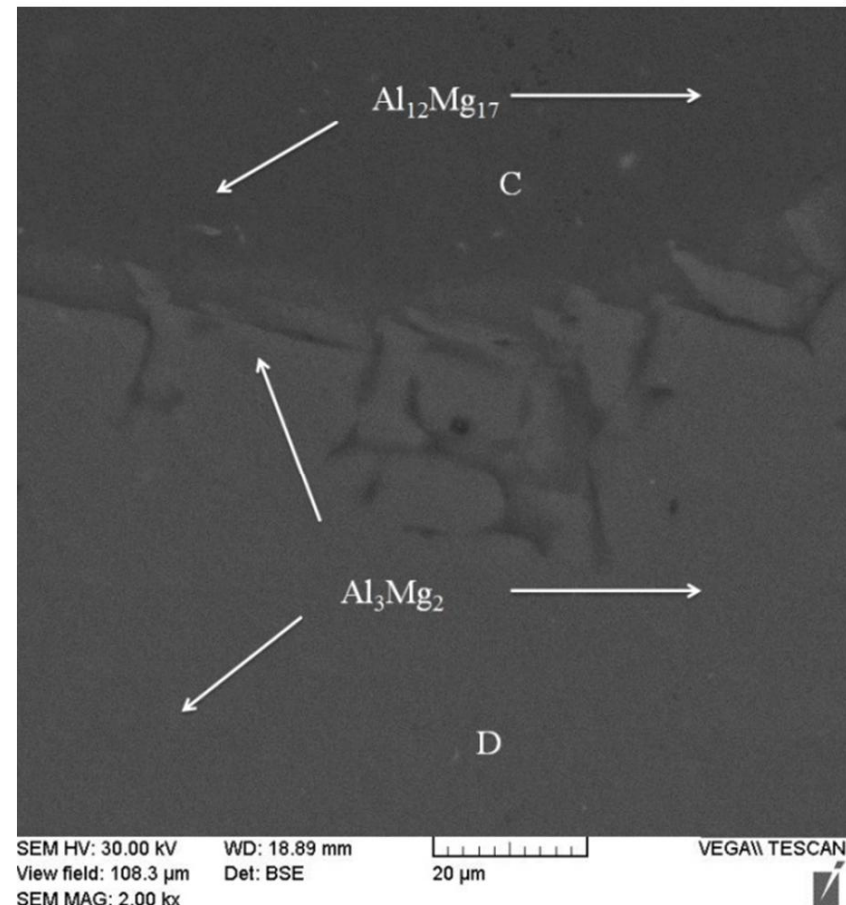
شکل ۲۰ نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس از فصل مشترک

۵- مراجع

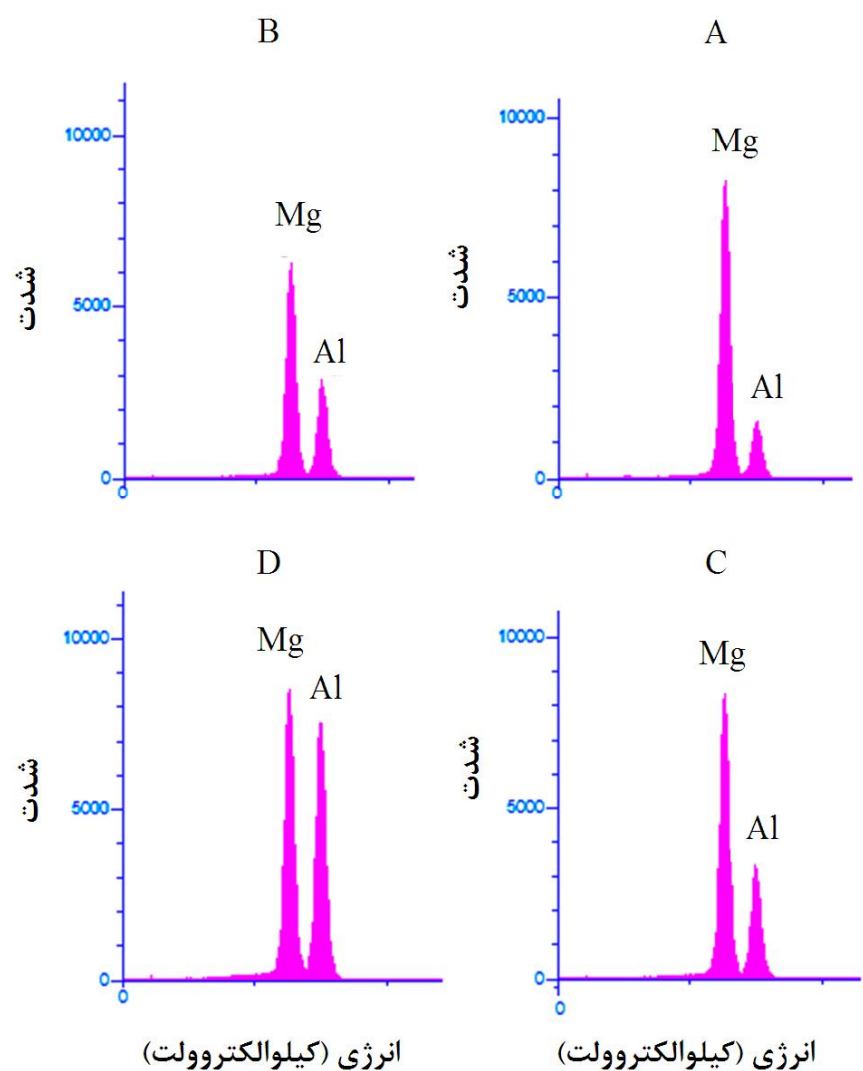
- [1] A. I. Taub, P. E. Krajewski, A. A. Luo, and J. N. Owens, "The Evolution of Technology for Materials Processing over the Last 50 Years: The Automotive Example," *JOM*, vol. 59, no. 2, pp. 48-57, 2007.
- [2] A. A. Luo, "Magnesium: Current and Potential Automotive Applications," *jom*, vol. 54, no. 2, pp. 42-48, 2002.
- [3] V. K. Patel, S. D. Bhole, and D. L. Chen, "Microstructure and mechanical properties of dissimilar welded Mg-Al joints by ultrasonic spot welding technique," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 17, no. 3, pp. 202-206, Apr. 2012.
- [4] L. Liu, H. Wang, and Z. Zhang, "The analysis of laser weld bonding of Al alloy to Mg alloy," vol. 56, pp. 473-476, 2007.
- [5] K. J. M. Papis, J. F. Loeffler, and P. J. Uggowitzer, "Light metal compound casting," *Sci. China Ser. E Technol. Sci.*, vol. 52, no. 1, pp. 46-51, Jan. 2009.
- [6] G. Xu, A. a. Luo, Y. Chen, and A. K. Sachdev, "Interfacial phenomena in magnesium/aluminum bi-metallic castings," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 595, pp. 154-158, Feb. 2014.
- [7] E. Hajjari, M. Divandari, S. H. Razavi, S. M. Emami, T. Homma, and S. Kamado, "Dissimilar joining of Al/Mg light metals by compound casting process," *J. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 20, pp. 6491-6499, May 2011.
- [8] W. W. and J. W. M. Hoeschl, "BMW's Magnesium-Aluminium Composite Crankcase, State-of-the-Art Light Metal Casting and Manufacturing," *SAE Tech. Pap.*, vol. 1, no. 0069, 2006.
- [9] A. F. Bauer, "method of bonding a bimetallic casting," 1962.
- [10] G. Chirita, D. Soares, and F. S. Silva, "Advantages of the centrifugal casting technique for the production of structural components with Al-Si alloys," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 1, pp. 20-27, Jan. 2008.
- [11] M. M. Avedesian, *Magnesium and Magnesium Alloys (ASM Specialty Handbook)* (ASM Specialty Handbook). ASM International; illustrated edition edition, 1999, p. 314.
- [12] J. R. Davis, "Aluminum and aluminum alloys," *ASM Spec. Handbook*, ASM Int. Mater. Park, 1993.
- [13] S. Wei, T. Centrifugal, C. Machine, S. Lampman, and A. S. M. International, "Centrifugal Casting," vol. 15, pp. 667-673, 2008.
- [14] W. Shi-ping, L. Chang-yun, G. Jing-jio, S. Yang-qing, L. Xing-qiao, and F. Heng-zhi, "Numerical simulation and experimental investigation of two filling methods in vertical centrifugal casting," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, no. 50434030, pp. 1035-1040, 2006.
- [15] E. Hajjari, M. Divandari, S. H. Razavi, S. M. Emami, and S. Kamado, "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," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 257, no. 11, pp. 5077-5082, 2011.
- [16] M. Divandari and J. Campbell, "Oxide film characteristics of Al-7Si-Mg alloy in dynamic conditions in casting," *Int. J. Cast Met. Res.*, vol. 17, no. 3, pp. 182-187, Mar. 2004.

اکسیددی جامد در سطح مذاب است.

- تفاوت در ضریب انبساط حرارتی آلومینیم و منیزیم منجر به ایجاد اتصال مکانیکی در فصل مشترک می شود.
- ساختار یوتکتیک و ترکیبات بین فلزی $Al_{12}Mg_{17}$ و Al_3Mg_2 در فصل مشترک تشکیل می شوند.



شکل ۱۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک در سمت آلومینیم



شکل ۱۸ نتایج آنالیز نقطه ای طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس از محل های مشخص شده در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

- alloy and Al alloy," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 7, pp. 3730–3735, Aug. 2011.
- [21] L. Y. and huang W. juan wang, "interface microstructure and diffusion kinetics in diffusion bonded Mg/Al joint," *Akadémiai Kiadó, Budapest Springer, Dordr.*, vol. 95, no. 1, pp. 71–79, 2008.
- [22] S. M. Emami, M. Divandari, H. Arabi, and E. Hajjari, "Effect of Melt-to-Solid Insert Volume Ratio on Mg/Al Dissimilar Metals Bonding," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 22, no. 1, pp. 123–130, May 2012.
- [23] V. Firouzdor and S. Kou, "Formation of liquid and intermetallics in Al-to-Mg friction stir welding," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 41, pp. 3238–3251, 2010.
- [17] R. Raiszadeh and W. D. Griffiths, "A method to study the history of a double oxide film defect in liquid aluminum alloys," *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.*, vol. 37, pp. 865–871, 2006.
- [18] T. Noguchi, N. Horikawa, H. Nagate, T. Nakamura, and K. Sato, "Application of flow and solidification simulation in cast-in insertion processing," vol. 18, no. 4, pp. 214–221, 2005.
- [19] I. Bhamji, M. Preuss, R. J. Moat, P. L. Threadgill, and a C. Addison, "Linear friction welding of aluminium to magnesium," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 17, no. 5, pp. 368–374, Jul. 2012.
- [20] L. Liu and D. Ren, "A novel weld-bonding hybrid process for joining Mg