

بررسی ضخامت فیلم اکسیدی زمان کوتاه تشکیل شده در ریخته‌گری آلیاژهای Al-2Mg و Al-1Mg

سید امیر آذر مهر دانشجوی دکتری مهندسی مواد، پژوهشکده مواد پیشرفته و انرژی‌های نو، سازمان

پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

حسین عربی استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت

مهدی دیواندری دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت

چکیده

از آنجا که امروزه گروه آلیاژی Al-Mg کاربرد وسیعی در صنایع حساس دارد، بررسی عوامل تشکیل عیوب در حین ریخته‌گری آنها بسیار ضروری است. یکی از مهمترین مشکلات ریخته‌گری آلیاژهای آلومینیم، حساسیت شدید مذاب به اکسیداسیون است. اگرچه حلالیت اکسیژن درون مذاب آلیاژهای آلومینیم نزدیک به صفر است، اما سطح مذاب به محض آنکه در معرض هوا قرار گرفت اکسید می‌شود. فیلم اکسیدی سطحی که سطحی چین‌خورده دارد، در اثر تلاطم سطحی مذاب وارد آن شده و موجب تشکیل فیلم اکسیدی دولایه می‌شود. در این پژوهش برای بررسی تاثیر غلظت منیزیم در آلیاژهای Al-1Mg و Al-2Mg بر روی ضخامت فیلم اکسیدی زمان کوتاه از روش ساندویچ اکسید-فلز-اکسید استفاده شد. در این آزمایش، هوا از کمپرسوری با فشار حدود ۰/۵ بار به صورت کنترل‌شده در چند نوبت با فاصله زمانی ۳ ثانیه به درون مذاب در حال بارریزی و انجماد دمیده شد. پس از انجماد قطعه، جداره نازک باقیمانده در میان دو حباب مجاور به عنوان نمونه استخراج شد. سطح و لبه این جداره که شامل دو لایه اکسیدی در دو طرف و یک لایه نازک فلز در وسط است، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که ضخامت فیلم اکسیدی سطحی زمان کوتاه مقدار ثابتی نداشته و برای آلیاژهای Al-1Mg و Al-2Mg به ترتیب در محدوده ۱۵۰-۲۰۰ و ۲۰۰-۳۰۰ نانومتر تغییر می‌کند.

کلمات کلیدی: آلیاژ آلومینیم-منیزیم، فیلم اکسیدی زمان کوتاه، ساندویچ اکسید-فلز-اکسید، اکسیداسیون کوتاه مدت، چین خوردگی، ضخامت.

An Investigation on the Thickness of Short Time Oxide Film Formed in Casting Process of Al-1Mg and Al-2Mg Alloys

S. A. Azarmehr Ph. D. Student, Department of Advanced Materials and Renewable Energies, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST)

H. Arabi Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology

M. Divandari Associate Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology

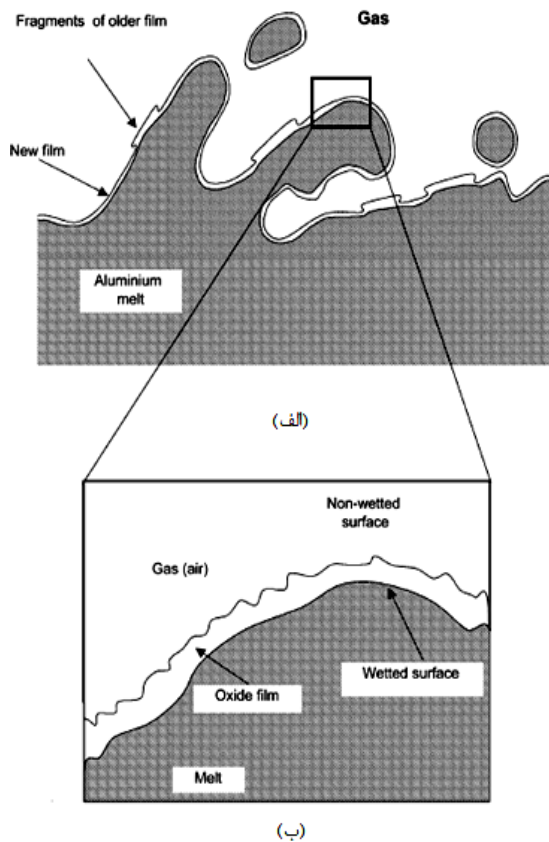
Abstract

As Al-Mg alloys have a great usage in various industries and the microstructures of these alloys are very sensitive to defects formation during casting, it seems a meticulous investigation of their microstructures can be beneficial for these industries. Although oxygen solubility in molten aluminium alloys is said to be negligible, since aluminum alloys melt are very sensitive to oxidation during casting, when the surface of melt is exposed to air it oxidizes quickly and an oxide film is formed on the melt surface. Then this surface oxide film can be folded and entrained into the melt due to surface turbulence. In this research, sandwiches of oxide-metal-oxide formed on a short time within the cast during solidification were used to study the effect of magnesium content (i.e. 1wt% and 2wt %) on the oxide film thickness. To form sandwiches of oxide-metal-oxide within the cast a certain amount of air was blown into the melt every 3 seconds during casting time by means of a compressor at 0.5 atmosphere pressure. Where bubbles of air reached each other, they formed a sandwich which later was used for investigating purpose. Both the thickness of oxide films and the surface of each layer were studied via SEM. The results showed that the thickness of the short time oxide film varies in the range of 150-200 and 200-300 nanometers for Al-1Mg and Al-2Mg alloys, respectively. This is a new finding for this type of alloys.

Keywords: Al-Mg alloy, Short time oxide film, Oxide-metal-oxide sandwich, Short time oxidation, Folding, Thickness.

۱- مقدمه

میکروترکها با اتصال به یکدیگر موجب ایجاد ترک پیوسته‌ای بین دو دیواره سطح مقطع نازک می‌شوند. [۷-۱۱، ۱۳-۱۵].



شکل ۱- نمایش طرحواره (الف) نحوه تا خوردن فیلم اکسیدی و تشکیل فیلم اکسیدی دولایه در اثر تلاطم سطحی مذاب و (ب) جزئیات مرتبط با فیلم اکسیدی سطحی زمان کوتاه که سطحی چین خورده دارد [۸]

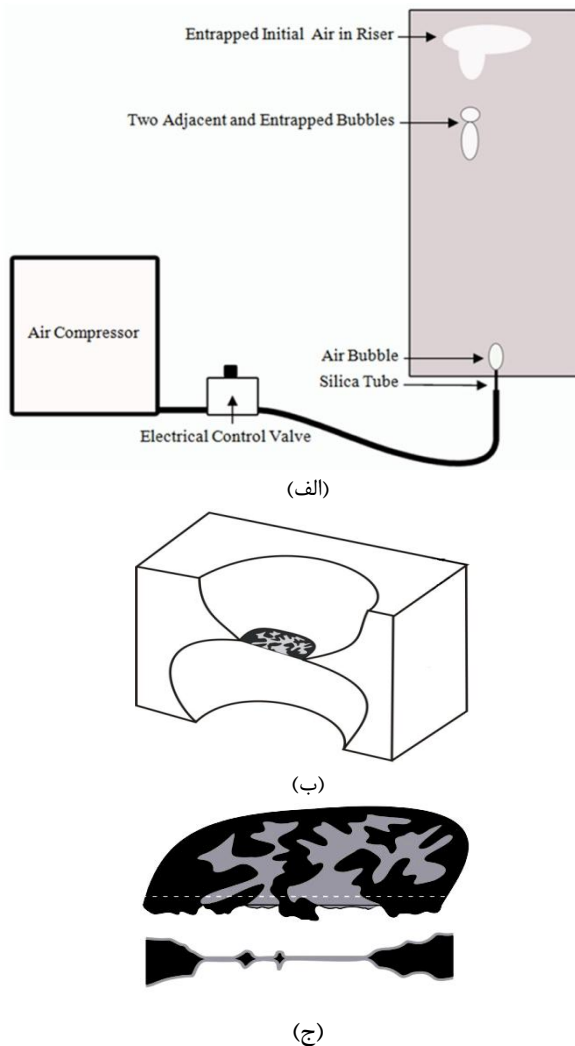
همان‌طور که پیش از این گزارش شده [۱۶]، تا خوردن فیلم اکسیدی در اثر افزایش ضخامت آن با مشکل روبرو شده و در نتیجه هوا و ماده بیشتری در میان آن محبوس می‌شود. به عبارت دیگر این مسئله می‌تواند موجب کاهش خواص مکانیکی قطعه شود. بنابراین بررسی تأثیر غلظت منیزیم روی ضخامت فیلم اکسیدی در آلیاژهای Al-Mg مفید به نظر می‌رسد. با توجه به قابلیت تکنیک ساندویچ اکسید-فلز-اکسید در بررسی مورفولوژی سطحی فیلم اکسیدی و اندازه‌گیری ضخامت فیلم اکسیدی دولایه از طریق مشاهده ساندویچ اکسید-فلز-اکسید [۷-۱۱، ۱۵]، از این روش در انجام پژوهش حاضر استفاده شده است. در این پژوهش با بررسی تصاویر SEM به دست آمده از سطوح چین خورده و همچنین نمای جانبی ساندویچ اکسید-فلز-اکسید، تأثیر غلظت منیزیم در آلیاژهای Al-Mg و

امروزه آلیاژهای آلومینیم از جمله گروه آلیاژی Al-Mg، کاربرد وسیعی در صنایع حساس مانند خودروسازی و هوافضا دارند. برای تولید چنین قطعات حساس و با کیفیتی باید نخست عیوب محتمل در ریخته‌گری آنها را شناخت. یکی از مشکلات اساسی ریخته‌گری آلیاژهای آلومینیم و به خصوص آلیاژهای Al-Mg، حساسیت بالا نسبت به اکسیداسیون است. اکسیداسیون بلند مدت آلیاژهای آلومینیم توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱-۵]. در حالیکه تحقیقات اندکی در زمینه اکسیداسیون کوتاه مدت این آلیاژها در شرایط ریخته‌گری انجام شده است [۶-۱۱]، بنابراین بررسی بیشتر در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد.

بر اساس تحقیقاتی که در زمینه اکسیداسیون آلیاژهای آلومینیم انجام شده است، سطح مذاب به محض آنکه در معرض هوا قرار گیرد، به سرعت دچار اکسیداسیون شده و فیلم اکسیدی نازک سطحی تشکیل می‌شود. فیلم اکسیدی سطحی در ابتدا آمورف است و در ادامه کریستاله می‌شود [۱-۵]. عناصر آلیاژی می‌توانند روی نرخ اکسیداسیون آلومینیم تأثیر بگذارند. این مسئله موجب افزایش چگالی فیلم اکسید آلومینیم در اثر تشکیل لایه‌ی اکسید محافظ دیگری روی آن و یا افزایش تحرک یون‌ها در لایه‌ی اکسیدی می‌شود. سیلیسیم، مس، روی و آهن کمترین اثر را روی رفتار مذاب آلومینیم دارند، در حالیکه منیزیم، سدیم، سلنیم و کلسیم سرعت اکسیداسیون را بالا می‌برند [۴].

در گزارشی که توسط Freti و همکارانش در زمینه مقایسه اکسیداسیون آلومینیم خالص و Al-3Mg در طول مراحل نخست اکسیداسیون و پیش از اکسیداسیون منقطع ارائه گردید، نشان داده شد که در دمای ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با افزودن ۳ درصد وزنی منیزیم، نرخ واکنش اکسیداسیون آلومینیم ۳۰ برابر افزایش یافته است. این محققین اعلام کرده‌اند، با افزایش دما از ۷۰۰ به ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، نرخ اکسیداسیون آلیاژها ۲ الی ۳ برابر می‌شود [۵].

در شرایط ریخته‌گری، اکسیداسیون حتی در زمان‌های زیر ثانیه مثل ۰/۱ ثانیه برای تشکیل فیلم اکسیدی و حتی ۰/۰۱ ثانیه در ریخته‌گری دایکاست، که حالت پاشش دارد، انجام می‌گیرد [۱۲]. در این حالت، فیلم اکسیدی سطحی که از یک طرف اتصال اتمی خوبی با مذاب دارد، در اثر تلاطم سطحی مذاب روی خود تا می‌خورد و فیلم اکسیدی دولایه درون مذاب تشکیل می‌شود (شکل ۱). بدین ترتیب فیلم اکسیدی دولایه که وارد مذاب شده موجب تشکیل میکروترک در قطعه شده و به خصوص در مواردی مانند قطعات دیواره نازک، این



شکل ۳- نمایش طرحواره (الف) فرآیند دمش هوا از کمپرسور هوا به داخل قالب و گیر افتادن و تماس حباب‌ها، (ب) نمونه بریده شده از قطعه و (ج) ساندویچ اکسید-فلز-اکسید از نمای بالا به همراه نمای جانبی مقطع مشخص شده در آن که نواحی تیره فلز محبوس و نواحی روشن فیلم اکسیدی است

این ساندویچ شامل دو لایه اکسیدی و یک لایه فلز بین دو لایه مزبور است و به همین دلیل ساندویچ خوانده می‌شود. جزئیات بیشتر در گزارش‌های محققین مورد اشاره قرار گرفته است [۷-۱۱، ۱۵]. پس از جداسازی ساندویچ سه لایه از قطعه به کمک اره، از آن به عنوان نمونه مورد نظر برای بررسی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

تصویر SEM بخشی از ساندویچ اکسید-فلز-اکسید در آلیاژ Al-1Mg در شکل ۴ نشان داده شده است. در تصویر ۴-الف، مناطق تیره از مناطق روشن به خوبی قابل تمایز است.

Al-2Mg بر روی ضخامت فیلم اکسیدی زمان کوتاه مورد بحث قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

به منظور انجام این پژوهش از شمش‌های آلومینیم و منیزیم خالص تجاری استفاده شد. عملیات ذوب با استفاده از یک کوره مقاومتی با بوته آلومینایی و دمای ریخته‌گری ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. برای تهیه نمونه‌های فیلم اکسیدی از تکنیک ساندویچ سه لایه اکسید-فلز-اکسید استفاده شد [۷]. برای تهیه قالب از مدل صفحه‌ای با سیستم راهگاهی کفریز که در شکل ۲ نشان داده شده است، استفاده گردید. قالبگیری این مدل با استفاده از ماسه CO_2 و به روش دستی انجام شد. برای ارسال هوا به داخل مذاب و در نتیجه تشکیل حباب در آن، کمپرسور هوا با فشار تقریباً ۰/۵ بار که مجهز به شیر کنترل برقی بود، مورد استفاده قرار گرفت. هوای خروجی از کمپرسور از میان لوله سیلیکایی با قطر داخلی ۱ میلی‌متر به صورت کنترل شده در چند نوبت با فواصل زمانی یکسان (۳ ثانیه) به داخل مذاب دمیده شد. اساس روش به این صورت است که با رسیدن تعدادی حباب به داخل مذاب و با حرکت این حباب‌ها به سمت بالا درون مذاب، و با توجه به تشکیل هسته‌های جامد، حباب‌ها پشت سر هم حرکت کرده و سپس متوقف می‌شوند. با توقف یک حباب، بقیه حباب‌ها پشت سر آن گیر کرده و بین آنها، به طور معمول، یک ساندویچ سه لایه تشکیل می‌شود (شکل ۳).



شکل ۲- مدل صفحه‌ای مورد استفاده در آزمایش

مناطق تیره قسمتی است که شامل سه لایه بوده و به صورت ساندویچ اکسید-فلز-اکسید ظاهر می‌شود. وجود فلز جامد، که به اندازه کافی ضخیم است، در بین این دو لایه اکسیدی تصویر میکروسکوپی را به صورت تیره نشان می‌دهد. اما وضعیت در مناطق روشن کاملاً متفاوت است، به طوری که احتمال دارد در این مناطق تنها فیلم اکسیدی دو لایه و یا ساندویچ سه لایه اکسید-فلز-اکسید با لایه نازکی از فلز در وسط وجود داشته باشد.

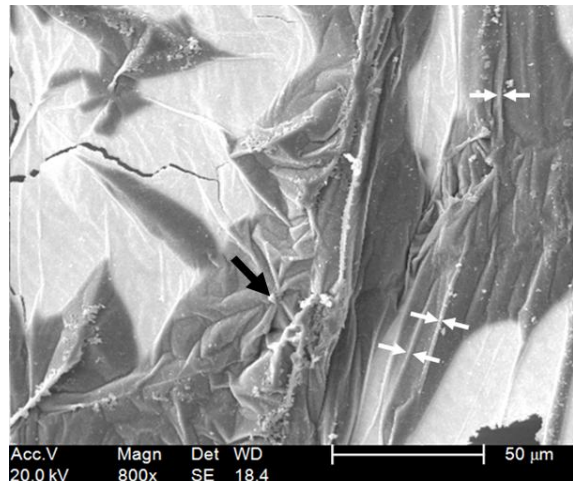
مناطق تیره قسمتی است که شامل سه لایه بوده و به صورت ساندویچ اکسید-فلز-اکسید ظاهر می‌شود. وجود فلز جامد، که به اندازه کافی ضخیم است، در بین این دو لایه اکسیدی تصویر میکروسکوپی را به صورت تیره نشان می‌دهد. اما وضعیت در مناطق روشن کاملاً متفاوت است، به طوری که احتمال دارد در این مناطق تنها فیلم اکسیدی دو لایه و یا ساندویچ سه لایه اکسید-فلز-اکسید با لایه نازکی از فلز در وسط وجود داشته باشد.

لایه نازک مذاب باقیمانده ممکن است بسته به شرایط موجود دچار وضعیت‌های مختلف شود. این لایه ممکن است به همان حالت منجمد شود و یا بخشی از نواحی لبه‌ای آن ابتدا اکسید و مابقی به صورت فلز منجمد گردد (منطقه C در شکل ۵-د). چنانچه لایه مذاب باقیمانده به اندازه کافی نازک باشد، احتمال دارد که کاملاً اکسید شود (منطقه B در شکل ۵-د) که در این مورد در ادامه توضیحات بیشتر داده خواهد شد. مناطقی که دچار تخلیه نسبی مذاب شده‌اند، به دلیل ضخامت کمی که دارند در تصاویر میکروسکوپ الکترونی به رنگ روشن دیده می‌شوند. بنابراین اگرچه ممکن است در این نواحی لایه نازکی از فلز نیز موجود باشد اما به دلیل ضخامت کم، اشعه الکترونی از آن رد می‌شود.

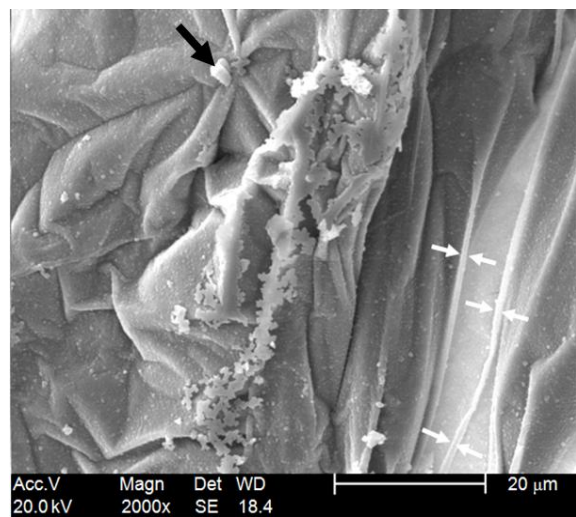
همان‌طور که در شکل ۴ نیز دیده می‌شود، فیلم اکسیدی زمان کوتاه که کل سطح نمونه را پوشانده است، سطحی چین‌خورده دارد. چین‌خوردگی‌های موجود در شکل ۴ را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد که شامل چین‌خوردگی‌های با چیدمان موازی و شعاعی در مناطق تیره و چین‌خوردگی‌های موجود در نواحی روشن تصویر است.

چین‌خوردگی‌های موجود در نیمه راست تصویر ۴-الف و ب در جهتی خاص به صورت تقریباً موازی تشکیل شده‌اند. اگرچه استنباط عمومی بر این است که فیلم اکسیدی ماده سرامیکی و ترد است، به نظر می‌رسد که در مراحل اولیه تشکیل آن بر روی مذاب، احتمالاً تحت تأثیر عواملی مانند ضخامت کم فیلم اکسیدی در لحظات ابتدایی، دمای بالای شروع تشکیل آن و ساختار بی‌شکل اولیه، تا حدی قابلیت انعطاف‌پذیری از خود نشان می‌دهد.

مناطق تیره قسمتی است که شامل سه لایه بوده و به صورت ساندویچ اکسید-فلز-اکسید ظاهر می‌شود. وجود فلز جامد، که به اندازه کافی ضخیم است، در بین این دو لایه اکسیدی تصویر میکروسکوپی را به صورت تیره نشان می‌دهد. اما وضعیت در مناطق روشن کاملاً متفاوت است، به طوری که احتمال دارد در این مناطق تنها فیلم اکسیدی دو لایه و یا ساندویچ سه لایه اکسید-فلز-اکسید با لایه نازکی از فلز در وسط وجود داشته باشد.



(الف)



(ب)

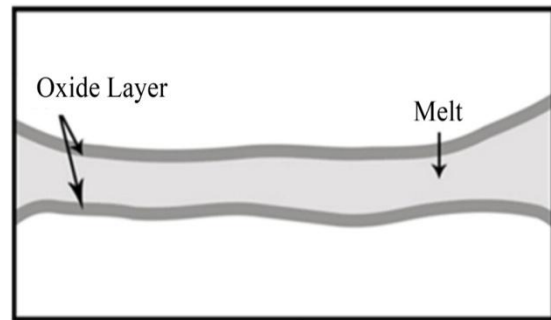
شکل ۴- (الف) تصویر SEM بخشی از ساندویچ اکسید-فلز-اکسید در آلیاژ Al-1Mg و (ب) تصویر مشابهی از شکل قبل در بزرگنمایی بالاتر که نشانگر سطح چین‌خورده فیلم اکسیدی زمان کوتاه و چین‌خوردگی‌های مناسب برای اندازه‌گیری ضخامت هستند

شکل طرحواره ۵ برای توضیح چگونگی تشکیل مناطق تیره و روشن در نمونه‌های حاصل از این روش ارائه شده است. وقتی هسته‌های انجمادی در مذاب محبوس در میان لایه‌های

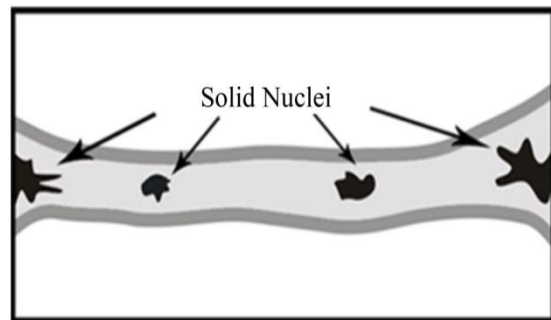
بنابراین فیلم اکسیدی در مراحل اولیه تشکیل نسبت به مراحل پایانی، مقاومت کمتری در مقابل تغییر فرم از خود نشان می‌دهد. چنانچه مذاب زیر فیلم اکسیدی سطحی دچار تنش شود، دو تصور مختلف می‌تواند مطرح باشد: (الف) در اثر اعمال تنش فیلم سطحی از مذاب جدا شود و (ب) در اثر اعمال تنش این جدایش اتفاق نیفتد. آنچه که به طور معمول دیده می‌شود این است که در اثر اعمال تنش، فیلم سطحی دچار چین خوردگی می‌شود. در ضمن مراجعه به منابع نشان می‌دهد که انرژی سطحی تر شدن فیلم اکسید آلومینیم توسط مذاب آلومینیم در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد 0.64 N/m است [۱۷]. در حالی که کشش سطحی آلومینیم اکسید نشده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد 1.13 N/m است [۱۸]. با توجه به مقادیر اعلام شده، جدایش فیلم اکسیدی سطحی از مذاب بعید به نظر می‌رسد. در این شرایط، با توجه به ترشوندگی مناسب بین مذاب و فیلم اکسیدی سطحی، تنش‌های وارده بر مذاب به فیلم سطحی نیز منتقل می‌شود. چنانچه این تنش‌ها به اندازه کافی بزرگ باشند (مانند تلاطم سطحی)، فیلم اکسیدی را مجبور به تغییر فرم می‌کنند؛ چراکه بهترین راه رهایی از تنش‌های وارده و در عین حال حفظ پیوند با مذاب، تغییر فرم است که به صورت چین خوردن روی می‌دهد. بنابراین به نظر می‌رسد چین خوردگی‌های با چیدمان موازی در شکل ۴، در اثر تنش مکانیکی بزرگی مانند تنش جریان مذاب در این منطقه تشکیل شده‌اند.

چین خوردگی‌های موجود در نیمه چپ تصویر ۴-ب، چیدمان شعاعی دارند و به نظر می‌رسد که در مرکز آنها (محل رسیدن چین خوردگی‌ها به هم) یک ناخالصی داخلی و یا خارجی (مشخص شده با پیکان سیاه در شکل ۴-الف و ب) وجود دارد. وجود این ناخالصی می‌تواند چین خوردگی موازی ناشی از تنش اعمالی به مذاب را تحت تأثیر قرار داده و آن را متوقف کند. در این شرایط نیروهای انقباضی که در اثر تفاوت رفتار انقباضی فلز و فیلم اکسیدی سطحی به وجود می‌آیند، تمایل دارند تا در مرحله انجماد، فیلم سطحی را دچار چین خوردگی کنند.

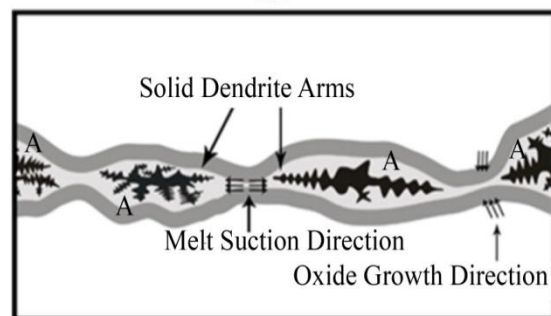
علاوه بر مناطق تیره در مناطق روشن نیز چین خوردگی‌هایی، البته با وضوح کمتر، مشاهده می‌شود. با دقت در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود که اکثر چین خوردگی‌های موجود در مناطق روشن تصویر، حداقل از یک طرف به نواحی پرتنش از مناطق تیره ختم شده‌اند. به نظر می‌رسد که فیلم اکسیدی در محل این چین خوردگی‌ها تحت تأثیر تنش‌های ناشی از مذاب موجود در مناطق تیره مجاور حاصل شده‌اند. به عبارت دیگر،



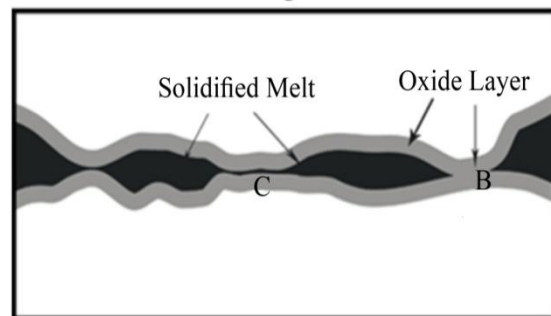
(الف)



(ب)



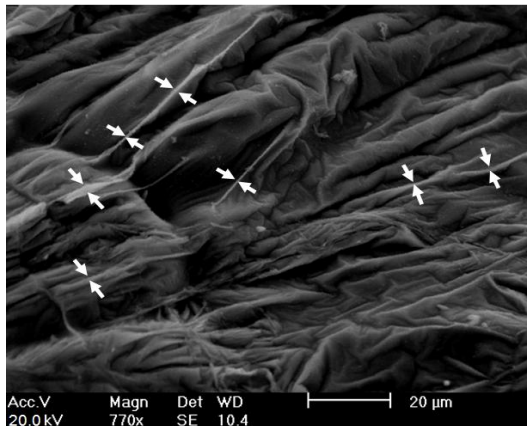
(ج)



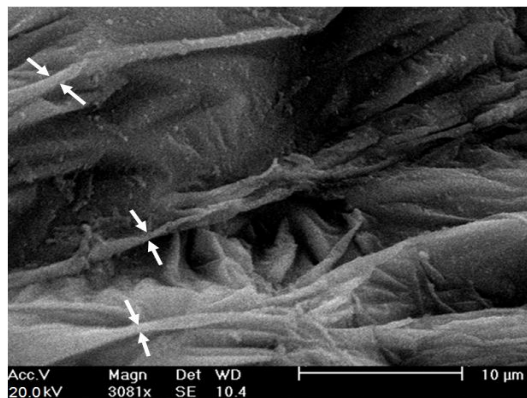
(د)

شکل ۵- نمایش طرحواره (الف) تشکیل ساندویچ اکسید-فلز-اکسید (ب) تشکیل هسته‌های انجمادی در مذاب محبوس (ج) ادامه انجماد، شروع رشد هسته‌ها و حرکت اتم‌های مایع به سمت هسته‌های جامد و در نتیجه تخلیه نسبی مذاب در فاصله بین هسته‌های انجمادی (د) اکسید شدن لایه بسیار نازک مذاب باقیمانده، ایجاد اتصال بین لایه‌های اکسیدی دو طرف و تشکیل یک لایه اکسیدی واحد (منطقه B) و همچنین باقی ماندن لایه نازک فلزی در میان فیلم‌های اکسیدی به هم نزدیک شده (منطقه C)

افزایشی ضخامت میانگین چین خوردگی با افزایش غلظت منیزیم در آلیاژ است.

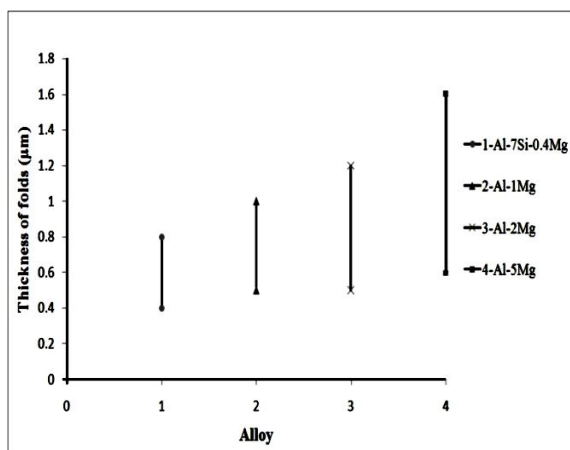


(الف)



(ب)

شکل ۶- (الف) بخشی از ساندویچ اکسید-فلز-اکسید در آلیاژ Al-2Mg و (ب) تصویر مشابهی از شکل قبل در بزرگنمایی بالاتر که نشانگر سطح چین خورده فیلم اکسیدی زمان کوتاه و چین خوردگی‌های مناسب برای اندازه‌گیری ضخامت هستند



شکل ۷- مقایسه ضخامت چین خوردگی اکسیدی در آلیاژهای مختلف آلومینیم [۸، ۹] که نشانگر افزایش مقدار منیم و همچنین دامنه ضخامت چین خوردگی با افزایش غلظت منیزیم در آلیاژ است

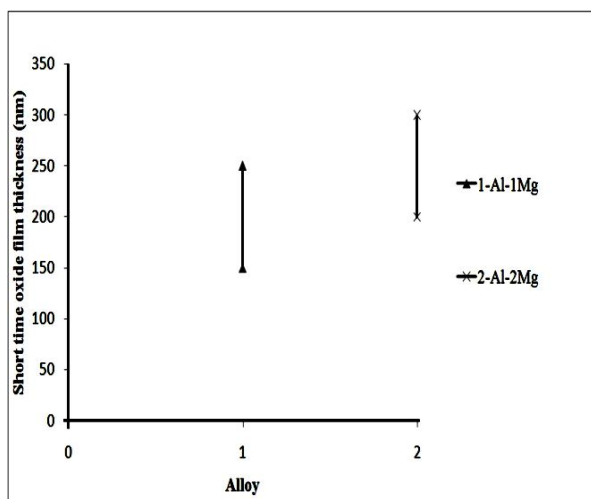
احتمال می‌رود که منشأ بسیاری از چین خوردگی‌های مشاهده شده در مناطق روشن، تنش مکانیکی باشد.

پیش از این برای تخمین ضخامت فیلم اکسیدی زمان کوتاه در روش ساندویچ اکسید-فلز-اکسید از نصف کردن ضخامت چین خوردگی استفاده شده است [۷-۱۱]. با این حال ضخامت چین خوردگی تحت تأثیر عواملی همچون میزان ماده محبوس در میان چین خوردگی، شدت تلاطم موضعی در محل هر چین خوردگی، استحکام و انعطاف‌پذیری فیلم اکسیدی، میزان حساسیت به اکسیداسیون و میزان هوای در دسترس برای اکسیداسیون است. بنابراین همواره سعی می‌شود، ضخامت چین خوردگی‌هایی اندازه‌گیری شود که در ظاهر نازکتر بوده و در ضمن ضخامتشان عمود بر تصویر باشند. بدین ترتیب میزان حساسیت این روش به عوامل جانبی (ضخامت فیلم اکسیدی عامل اصلی است) کاهش می‌یابد و می‌توان از آن، با در نظر گرفتن منیم ضخامت اندازه‌گیری شده برای چین خوردگی‌ها در هر آلیاژ و مقایسه آنها با مقادیر اندازه‌گیری شده در آلیاژهای مختلف، با اطمینان خوبی برای مقایسه حساسیت آلیاژها به اکسیداسیون استفاده کرد. لازم به یادآوری است که میزان حساسیت آلیاژ به اکسیداسیون و میزان استحکام و انعطاف-پذیری فیلم اکسیدی از خصوصیات ذاتی مذاب و فیلم است، به طوری که هر چه حساسیت آلیاژ به اکسیداسیون بیشتر باشد، ضخامت فیلم اکسیدی و در نتیجه استحکام آن بیشتر و تا خوردن مشکل‌تر می‌شود، بنابراین فیلم به دشواری تاخورد و مذاب بیشتری در میان آن محبوس می‌شود.

شکل ۶ قسمتی از ساندویچ اکسید-فلز-اکسید در آلیاژ Al-2Mg را نشان می‌دهد. رنگ تیره شکل ۶ نشان می‌دهد که در این قسمت از ساندویچ سه لایه، مقدار قابل توجهی مذاب- با ضخامت میکرومتری- در میان فیلم‌های اکسیدی گیر افتاده است. با توجه به حضور پررنگ مذاب در این منطقه، به نظر می‌رسد که چین خوردگی‌های موجود در این شکل، همگی در اثر تنش‌های مکانیکی ناشی از جریان مذاب ایجاد شده‌اند.

در این پژوهش سعی شده است تا با توجه به نکات مطرح شده در فوق، ضخامت چین خوردگی‌های مناسب در دو آلیاژ مورد نظر که برخی از آنها در شکل‌های ۴ و ۶ با پیکان‌های سفید مشخص شده‌اند، اندازه‌گیری شود. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، ضخامت چین خوردگی‌ها به ترتیب در محدوده ۰/۵-۱/۲، ۰/۵-۱ میکرومتر برای آلیاژهای Al-1Mg و Al-2Mg قرار دارد. نتایج اندازه‌گیری در این پژوهش و تحقیقات قبلی [۸، ۹] در شکل ۷ ارائه شده که نشانگر روند

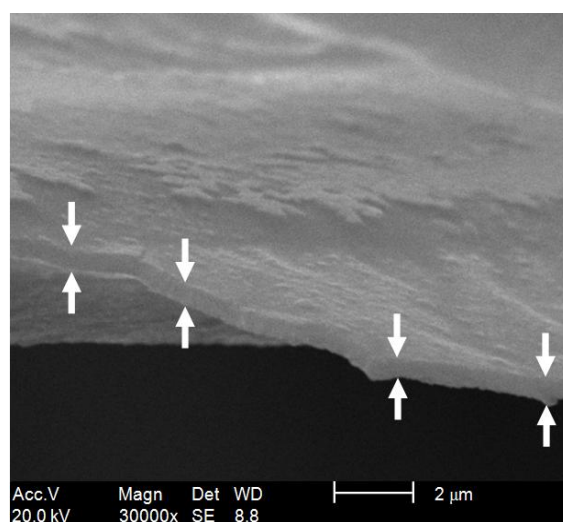
با نصف کردن مقادیر اندازه‌گیری شده برای ضخامت این مناطق، ضخامت تقریبی فیلم اکسیدی زمان کوتاه به دست می‌آید که نتایج مربوطه در شکل ۹ ارائه شده است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که ضخامت فیلم اکسیدی زمان کوتاه در این دو آلیاژ مقدار ثابتی ندارد و در یک محدوده متغیر است. همان‌طور که در شکل ۹ پیداست، با افزایش غلظت منیزیم در دو آلیاژ Al-1Mg و Al-2Mg، مقادیر میانگین و کمینه ضخامت فیلم اکسیدی زمان کوتاه نیز افزایش می‌یابد.



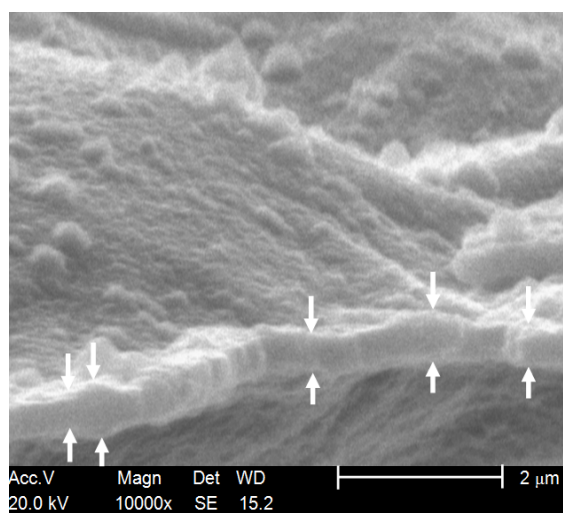
شکل ۹- تأثیر غلظت منیزیم بر ضخامت فیلم اکسیدی زمان کوتاه در آلیاژهای Al-1Mg و Al-2Mg

اگرچه انتظار می‌رود در محل رسیدن دو فیلم اکسیدی به هم، اتصالی بین آنها وجود نداشته باشد، اما در شکل ۸ یک لایه یکپارچه در محل رسیدن دو فیلم اکسیدی به هم مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد که وضعیت مشاهده شده در شکل ۸، تحلیل ارائه شده در شکل ۵ را تقویت می‌کند. شکل ۱۰ ساز و کار یکپارچه شدن فیلم اکسیدی دولایه در مناطقی از ساندویچ اکسید-فلز-اکسید که دچار تخلیه مذاب شده‌اند را به صورت طرحواره نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده، به نظر می‌رسد وقتی لایه به اندازه کافی نازک از مذاب در میان فیلم‌های اکسیدی باقی می‌ماند، می‌تواند در ادامه دچار اکسیداسیون شود و پیوندی میان دو فیلم اکسیدی اولیه ایجاد کند. بدین ترتیب ساندویچ اکسید-فلز-اکسید در این منطقه فقط از جنس سرامیکی و در نتیجه ترد بوده و در اثر تنش‌های مکانیکی ناشی از ارتعاشات حاصل از مرحله برش و تهیه نمونه دچار ترک می‌شود. باید توجه داشت که تبدیل فیلم اکسیدی دو لایه به یک فیلم اکسیدی یکپارچه منجر به کاهش تأثیر منفی فیلم اکسیدی دولایه در نواحی مورد نظر می‌شود. لازم به

مناطق از ساندویچ اکسید-فلز-اکسید که در آن به دلیل کمبود و یا تخلیه مذاب، فیلم‌های اکسیدی به هم نزدیک شده‌اند (مناطق B و C در شکل ۵-د) نسبت به مناطقی که فلز محبوس بیشتری دارند، تردترند. بنابراین امکان شکسته و خرد شدن ساندویچ اکسید-فلز-اکسید در مناطقی که فلز محبوس بسیار کمی دارند، بیشتر است. شکل ۸ تصاویری از این مناطق را از نمای جانبی برای آلیاژهای Al-1Mg و Al-2Mg نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در این تصاویر، محل رسیدن دو فیلم اکسیدی به هم به صورت عمود بر تصویر SEM دیده می‌شود. بنابراین به کمک این تصاویر امکان اندازه‌گیری ضخامت فیلم اکسیدی دولایه وجود دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۸- تصاویر ساندویچ اکسید-فلز-اکسید در محل به هم رسیدن دو فیلم اکسیدی از نمای جانبی در آلیاژهای (الف) Al-1Mg و (ب) Al-2Mg

شکل‌های ۷ و ۹ نشان می‌دهند که با افزایش غلظت منیزیم در آلیاژ، مقادیر اندازه‌گیری شده برای ضخامت میانگین و البته منیمم ضخامت چین‌خوردگی‌ها و همچنین ضخامت فیلم اکسیدی دولایه روندی افزایشی دارند. اگرچه میزان ماده محبوس در میان فیلم‌های اکسیدی نقش به‌سزایی در ضخامت چین‌خوردگی‌ها و حتی نقش کم‌رنگی در ضخامت فیلم اکسیدی دولایه دارد، اما ضخامت خود فیلم اکسیدی نیز در این مورد بسیار مؤثر است. از آنجاکه با افزایش غلظت منیزیم در آلیاژهای Al-Mg، شدت حساسیت آلیاژ به اکسیداسیون افزایش می‌یابد [۱-۳، ۵، ۶، ۸]، انتظار می‌رود لایه ضخیم‌تری از سطح مذاب دچار اکسیداسیون شود. شکل ۹ که نشانگر افزایش ضخامت فیلم اکسیدی زمان کوتاه در اثر افزایش غلظت منیزیم است، به خوبی این مسئله را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

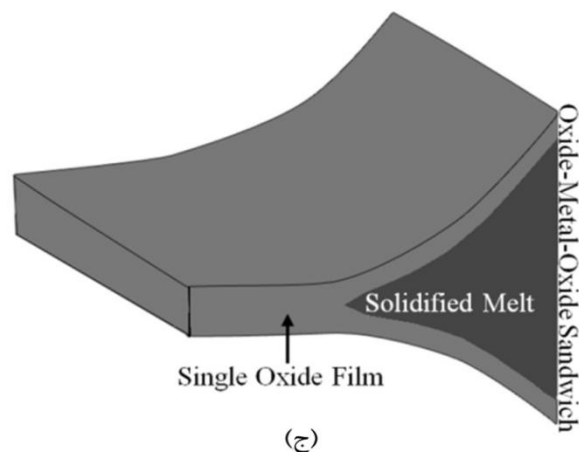
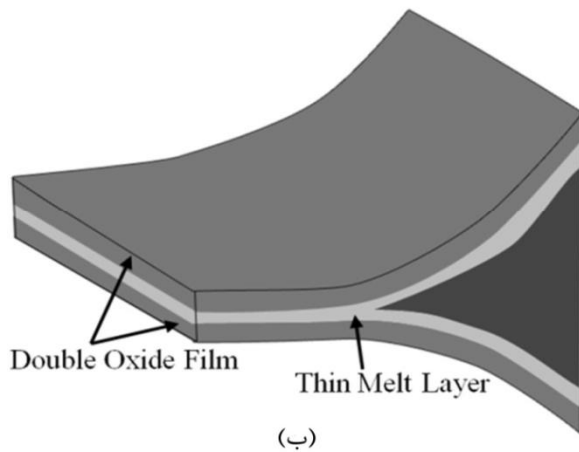
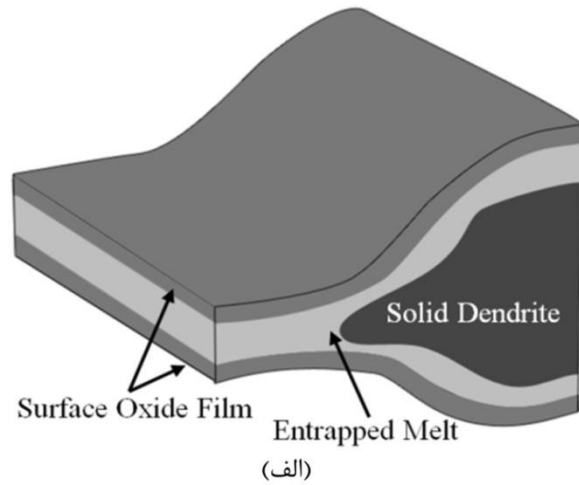
۱- ضخامت فیلم اکسیدی زمان کوتاه در آلیاژ مقدار ثابتی نیست بلکه در یک محدوده تغییر می‌کند. این محدوده برای آلیاژ Al-1Mg ۱۵۰-۲۰۰ نانومتر و در آلیاژ Al-2Mg ۲۰۰-۳۰۰ نانومتر در آزمایش ساندویچ اکسید-فلز-اکسید به دست آمد.

۲- فیلم اکسیدی دولایه تحت شرایط خاص، مانند زمانی که لایه بسیار نازک مذاب در میان آن محبوس شده، می‌تواند به فیلم اکسیدی یکپارچه تبدیل شده و در نتیجه آثار منفی آن روی خواص مکانیکی قطعه کاهش یابد.

مراجع

- [1] Thiele, W. "Oxidation of melts of Al and of Al alloys." *Aluminum*, Vol. 38, pp. 707-715, 1962.
- [2] Haginoya, I., Fukusako, T. "Oxidation of molten Al-Mg alloys." *Trans. of the Japan Inst. of Met.*, Vol. 24, No. 9, pp. 613- 619, 1983.
- [3] Ozdemir, O., Gruzleski, J. E., Drew, R. A. L. "Effect of low-levels of strontium on the oxidation behavior of selected molten aluminum-magnesium alloys." *Oxid. Met.*, Vol. 72, pp. 241-257, 2009.
- [4] Cochran, C. N., Belitskus, D. L., Kinosz, D. L. "Oxidation of aluminum-magnesium melts in air, oxygen, flue gas, and carbon dioxide." *Met. Tran.B*, Vol. 8B, pp. 323-332, 1977.
- [5] Freti, S., Bornand, J. D., Buxmann, K. "Metallurgy of dross formation on aluminium melts." *Light Metals*, pp. 1003-1016, 1982.
- [6] Wightman, G., Fray, D. J. "The dynamic oxidation of aluminum and its alloys." *Met. Trans.B*, Vol. 14B, pp. 625-631, 1983.

یادآوری است که در صورت در نظر گرفتن لایه نازک مذاب که بین فیلم‌های اکسیدی باقی ماند و اکسید شد، ضخامت یک فیلم اکسیدی زمان کوتاه مقداری از مقادیر اندازه‌گیری و نشان داده شده در شکل ۹ کمتر است.



شکل ۱۰- نمایش طرحواره ساندویچ اکسید-فلز-اکسید از نمای جانبی در مناطقی که کمبود مذاب وجود دارد. (الف) تشکیل هسته انجمادی (ب) تخلیه نسبی مذاب در مناطقی که کمبود مذاب داشته به طرف هسته انجمادی و باقی ماندن لایه بسیار نازک مذاب در آن محل، (ج) اکسید شدن لایه بسیار نازک مذاب باقیمانده و تشکیل یک لایه اکسیدی واحد

- [7] Divandari, M. and Campbell, J. "A new technique for the study of aluminum oxide films", *Aluminum Trans.*, Vol. 2, pp. 233-238, 2000.
- [8] Divandari, M. and Campbell, J. (2005). "Morphology of oxide films of Al-5Mg alloy in dynamic conditions in casting." *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 18, No. 3, pp. 1-6.
- [9] Divandari, M. and Campbell, J. "Oxide film characteristics of Al-7Si-Mg alloy in dynamic conditions in casting." *Int. Jour. of Cast Met. Res.*, Vol. 17, No. 3, pp. 1-6, 2004.
- [۱۰] آذر مهر سید امیر، دیوانداری مهدی، عربی حسین، نابی بهزاد، "تاثیر میزان منیزیم روی خصوصیات فیلمهای اکسیدی در آلیاژهای آلومینیم-منیزیم"، انتشارات جامعه ریخته‌گران ایران، شماره ۹۴، بهار و زمستان ۱۳۸۸.
- [۱۱] نابی بهزاد، دیوانداری مهدی، نعیمی جمال محمدرضا، "بررسی خصوصیات (ضخامت و مورفولوژی) فیلمهای اکسیدی تشکیل شده در مذاب آلومینیم خالص"، انتشارات جامعه ریخته‌گران ایران، شماره ۹۲، بهار و تابستان ۱۳۸۸.
- [12] Divandari, M. and Campbell, J. "The mechanism of bubble damage in castings." *1st Int. Conf. on Gating, Filling and Feeding of Aluminum Castings*, Opryland Hotel, Nashville TN, pp.49-63, 1999.
- [13] Campbell, J. "Castings", 2nd Ed. Butterworth-Heinemann Pub. Co., Oxford, 2003.
- [14] Campbell, J. "Entrainment defects." *Mat. Sci. and Tech.*, Vol. 22, No. 2, pp.127-145, 2006.
- [15] Mirak, A. R., Divandari, M., Boutorabi, S. M. A., Campbell, J. "Oxide film characteristics of AZ91 magnesium alloy in casting conditions." *Int. Jour. of Cast Met. Res.*, Vol. 20, No. 4, pp. 215-220, 2007.
- [۱۶] میرک علیرضا، دیوانداری مهدی، بوترابی سید محمدعلی، "مطالعه مورفولوژی فیلم اکسید تشکیل شده در شرایط ریخته‌گری آلیاژهای منیزیم (AZ91)"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۱، شماره ۸، اسفند ۱۳۸۶.
- [17] Impey, S., Stephenson, D. J., Nicholls, J. R. "Mechanism of scale growth on liquid aluminium." *Mat. Sci. and Tech.*, Vol. 4, pp. 1126-1132, 1988.
- [18] Cordovilla, C. G., Louis, E., Pamies, A. "The surface tension of liquid pure aluminium and aluminium-magnesium alloy." *Jour. of Mat. Sci.*, Vol. 21, pp. 2787-2792, 1986.