

تأثیر میزان منیزیم روی خصوصیات فیلم‌های اکسیدی در آلیاژهای آلومینیم-منیزیم

سید امیر آذرمهر، مهدی دیوانداری، حسین عربی، بهزاد ناییبی
دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

Effects of Magnesium Contents on Characteristics of Al-Mg Alloys Oxide Films

S. A. Azarmehr, M. Divandari, H. Arabi, B. Nayebi

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

چکیده

به علت حساسیت بالای آلیاژهای آلومینیم-منیزیم مذاب نسبت به اکسیداسیون، چنانچه ملاحظات ویژه در طول تهیه مذاب و انتقال آن به محفظه قالب صورت نگیرد، مذاب به سرعت دچار اکسیداسیون می‌شود و روی سطوح آزاد آن لایه اکسیدی تشکیل می‌شود. به نظر می‌رسد، فیلم‌های اکسیدی که در زمان کوتاه در حین بارریزی تشکیل و وارد مذاب می‌شوند، منشا بسیاری از عیوب مانند حفرات گازی و انقباضی و غیره باشند. در این تحقیق، نمونه‌ها با استفاده از دمش حباب هوا به درون مذاب و تشکیل ساندویچ اکسید-فلز-اکسید تهیه گردیدند و خصوصیات فیلم اکسیدی نظیر ضخامت و مورفولوژی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی برای آلیاژهای Al-1Mg و Al-5Mg مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این کار با نتایج حاصل از تحقیقات سایر محققان مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه نتایج تحقیق حاضر و تحقیقات سایر محققان نشان داد که با افزایش درصد منیزیم، ضخامت چین‌خوردگی‌های اکسیدی و فیلم اکسیدی جدید افزایش یافته است.

کلید واژه: آلیاژ آلومینیم-منیزیم، فیلم اکسیدی دولایه، ساندویچ اکسید-فلز-اکسید، تاخوردگی، چروکیدگی

ABSTRACT

Molten Aluminum-magnesium alloys oxidize rapidly during casting and handling if adequate prevention measures are not taken. Oxide films that form in a very short time during pouring the melt into moulds seem to be one of the main reasons for dross-like defects, porosities and etc. The characteristics of these films in Al-1Mg and Al-5Mg were studied and compared with the results of similar researches published in literature. For this investigation, Samples of oxide-metal-oxide sandwich were prepared by the bubble impingement technique. Features such as thickness, size and morphology of the oxide film have been examined by SEM. Results show that thickness of oxide folding increase with increasing the magnesium content in Al-Mg alloys.

Keywords: Al-Mg alloy, double layer oxide film, oxide-metal-oxide sandwich, fold, wrinkle

درصد وزنی منیزیم، قطعاً اکسید منیزیم بی شکل تشکیل می شود، البته اغلب در درصدهای کمتر هم این اتفاق می افتد [۴]. فیلم اکسید منیزیم بی شکلی که روی آلیاژهای آلومینیم- منیزیم مذاب تشکیل می شود، نسبت به آلومینای بی شکل و آلومینای گاما خاصیت حفاظتی ندارد. این بدان معناست که آلیاژهای آلومینیم- منیزیم نسبت به آلومینیم خالص تمایل بیشتری به اکسیداسیون دارند. در آلیاژهای آلومینیم- منیزیم، اکسیداسیون منقطع با تشکیل اکسید منیزیم کریستالی و یا اسپینل در میان لایه اکسیدی انجام می شود که مکانیزم و ترتیب تشکیل این دو حالت رقابتی دارد. به نظر می رسد در قسمت هایی که میزان منیزیم کمتر است، ترجیحاً اسپینل تشکیل می شود. افزایش درصد منیزیم دوره نهفتگی منقطع را کاهش می دهد و سرعت اکسیداسیون را بالا می برد [۵].

گزارش شده است که در مراحل اولیه اکسیداسیون آلیاژ آلومینیم- منیزیم مذاب، با مهاجرت یون های منیزیم به سطح آلیاژ، سطح مذاب توسط اکسید منیزیم پوشیده می شود. به دلیل شیب فعالیت منیزیم به طرف سطح مذاب، مهاجرت یون های منیزیم به طرف لایه اکسیدی ادامه می یابد. همزمان، یون های اکسیژن از میان لایه اکسید منیزیم نفوذ کرده و به فصل مشترک مذاب- اکسید می رسند. بدین ترتیب با رسیدن یون های منیزیم و اکسیژن به هم در فصل مشترک اکسید- مذاب، بلورهای اسپینل می توانند تشکیل شوند. در واقع تشکیل اسپینل نیازمند زمان است. رشد بلورهای اسپینل به سمت سطح مذاب موجب ایجاد تنش شده و لایه اکسید منیزیم اولیه را تخریب می کند، در نتیجه اکسیداسیون منقطع شکل می گیرد. اکسیداسیون خطی با رشد بلورهای اسپینل و خروج بخار منیزیم از میان ترک ها ادامه می یابد. بدین شکل، لایه جدیدی از اکسید منیزیم در اطراف بلورهای اسپینل در حال رشد، تشکیل می شود. سرانجام در مراحل پایانی، با افزایش ضخامت لایه اکسید منیزیم با زمان و در نتیجه افزایش مسیر نفوذ یون های اکسیژن، اکسیداسیون پارابولیک رخ می دهد [۶]. اگرچه سطح آلیاژهای آلومینیم مذاب به محض آن که در معرض هوا قرار گرفت دچار اکسیداسیون می شود، اما حضور این فیلم های اکسیدی روی سطح مذاب چندان مضر نیست و حتی به عنوان پوشش عمل کرده و می تواند بقیه مذاب را از

به دلیل وجود خصوصیات هم چون سبکی، دمای ذوب پایین، قابلیت فرم پذیری و نسبت استحکام به وزن بالا، آلیاژهای گروه آلومینیم- منیزیم در صنایع مختلفی از جمله صنایع هوا- فضا و خودرو کاربردهای فراوانی پیدا کرده اند. با این حال حساسیت بالای این آلیاژها به اکسیداسیون در حالت مذاب و تشکیل عیوب مرتبط با این پدیده، تولید قطعات ریختگی با قابلیت اعتماد بالا را با مشکل مواجه ساخته است. از این رو مطالعه مکانیزم اکسیداسیون و نحوه تشکیل عیوب مرتبط با آن در این آلیاژها، به منظور رفع چالش های پیش رو ضروری به نظر می رسد [۱ و ۲].

قابلیت اکسیداسیون گروه آلیاژی آلومینیم- منیزیم در حدی است که به محض تماس سطح مذاب آن ها با اکسیژن، به سرعت لایه نازک اکسیدی بر روی آلیاژ مذاب تشکیل می شود [۲-۱]. بسته به شرایط (دما، غلظت منیزیم، فشار اکسیژن و غیره)، امکان تشکیل سه فاز اکسیدی اکسید آلومینیم (Al_2O_3)، اسپینل ($MgAl_2O_4$) و اکسید منیزیم (MgO) وجود دارد. محدوده پایداری این سه فاز اکسیدی بر حسب غلظت منیزیم در آلیاژهای آلومینیم- منیزیم در جدول ۱ که بر اساس نتایج حاصل از مدل های ارائه شده توسط محققین مختلف تهیه شده، قید شده است [۸-۱۲].

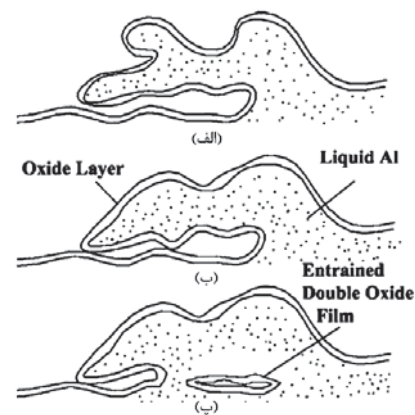
جدول ۱: محدوده تشکیل فازهای اکسیدی در آلیاژ آلومینیم- منیزیم مذاب بر حسب غلظت های متفاوت منیزیم [۹]

Table 1: Formation range of oxides in Al-Mg alloy melt with Mg concentration [9]

فاز اکسیدی	Al_2O_3	$MgAl_2O_3$	MgO
محدوده غلظت منیزیم (درصد وزنی)	۰-۰/۱۹	۰/۰۰۰۱-۱۰	۰/۱-۱۰۰

بر اساس نتایج به دست آمده از اکسیداسیون آلیاژهای آلومینیم- منیزیم مذاب در زمان طولانی، نخستین فاز اکسیدی که روی آلیاژ مذاب تشکیل می شود بیشتر به صورت اکسید منیزیم بی شکل است تا اکسید آلومینیم بی شکل، اگر چه میان این دو برای تشکیل رقابت وجود دارد. گزارش شده است که روی سطح مذاب آلیاژهای آلومینیم- منیزیم با محتوای منیزیم بیشتر از ۱

اکسیداسیون بیشتر محافظت کند. لایه اکسیدی تشکیل شده بر روی سطح مذاب، از یک طرف اتصال اتمی خوبی با مذاب زیر خود دارد و از طرف دیگر نیز خشک بوده و در تماس با هوا است. فیلم اکسیدی سطحی زمانی مشکل ساز می شود که وارد مذاب شود. در واقع، وقتی فیلم سطحی در اثر عواملی همچون تلاطم سطحی وارد مذاب می شود، بر روی خود تاخوردگی و موجب تشکیل فیلم دولایه اکسیدی می شود. شکل ۱ نحوه تشکیل فیلم اکسیدی دولایه در اثر تلاطم مذاب و تا خوردن لایه اکسیدی بر روی هم را نشان می دهد [۱، ۲، ۷، ۱۳-۱۵].



شکل ۱: نمایش شماتیک ورود عیب فیلم اکسیدی دولایه: (الف) تشکیل موج متلاطم در اثر تلاطم سطحی که (ب) موجب تماس سطوح غیر ترشونده فیلم اکسیدی شده است و بدین ترتیب (پ) فیلم اکسیدی دولایه در توده مذاب به صورت ترک غوطه ور عمل می کند [۱].

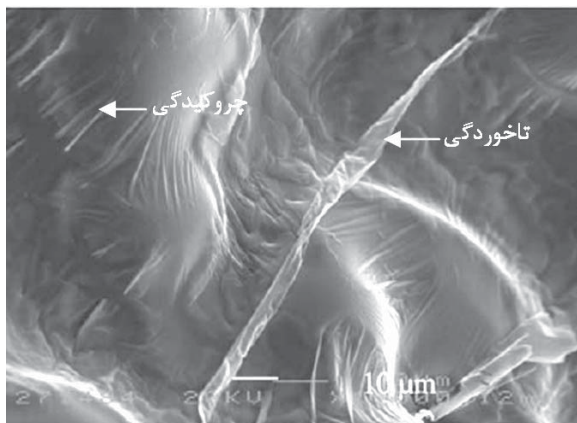
Fig. 1: Schematic showing Entraining a double oxide film defect: (a) in the form of turbulence wave due to surface turbulence, (b) in the form of two unwetted sides oxide films contact with each other, (c) in the form of double oxide film is submerged in the bulk liquid and act as submerged cracks [1].

هنگام تشکیل فیلم اکسیدی دو لایه، سطوح آزاد فیلم اکسیدی اولیه در تماس با هم قرار می گیرند و به علت عدم قابلیت ترشوندگی این سطوح، اتصال شیمیایی چندانی میان آنها برقرار نمی شود. بدین ترتیب، فیلم اکسیدی دولایه می تواند در صورت ورود به درون توده مذاب، به صورت بالقوه به عنوان ترک عمل کند و پس از انجماد، افت خواص مکانیکی قطعه را در پی داشته باشد. باید توجه داشت که فیلم های دولایه اکسیدی محل جوانه زنی بسیاری از عیوب مانند حفرات گازی و انقباضی نیز هستند [۱، ۲، ۷، ۱۳-۱۵]. بنابراین توجه به فیلم های دولایه اکسیدی برای افزایش قابلیت اعتماد به قطعه ریخته گری

بسیار حائز اهمیت است.

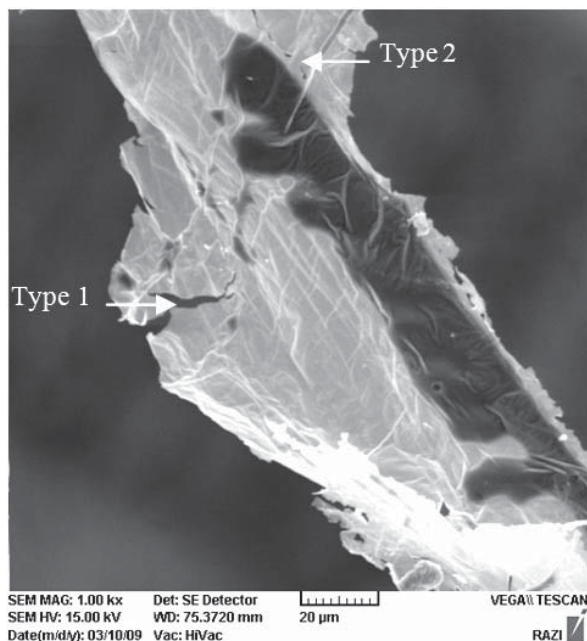
یکی از مهمترین ویژگی های لایه اکسیدی سطحی تشکیل شده در زمان کوتاه، مورفولوژی چین خورده و ناهموار آن است. به عبارت دیگر سطوح مقابل هم در فیلم اکسیدی دولایه زبر و خشن اند. بنابراین انتظار نمی رود که این سطوح ناهموار بتوانند کاملاً روی هم منطبق شوند. بسته به اینکه ناهمواری های دو سطح مقابل هم در فیلم دولایه نسبت به هم چه وضعیتی دارند، فیلم دولایه شکل متفاوتی خواهد داشت. همچنین ممکن است مقادیری هوا (یا گاز) در میان چین خوردگی های لایه اکسید سطحی به دام افتاده و وارد مذاب شود. بنابراین نوع چین خوردگی و نحوه تشکیل آن در یک لایه اکسیدی، به عنوان معیاری از توانایی یک لایه اکسیدی در وارد کردن گاز به مذاب نیز مطرح است [۲، ۷، ۱۵-۱۷].

نحوه بروز چین خوردگی در لایه های اکسیدی زمان کوتاه، متفاوت است و به دو گروه چروکیدگی و تاخوردگی تقسیم می شود (شکل ۲). چروکیدگی در اثر اختلاف میان ضرایب انقباض مذاب و فیلم اکسیدی روی آن به وجود می آید. به عبارت دیگر، تنش انقباضی اعمال شده به فیلم اکسیدی در حین انجماد، موجب بروز چروکیدگی می شود. در حالی که تاخوردگی در اثر تنش های مکانیکی ناشی از حرکت متلاطم مذاب در قالب به وجود می آید [۱۷ و ۱۸]. با مقایسه عوامل تشکیل این دو نوع چین خوردگی بدیهی است که تاخوردگی نسبت به چروکیدگی مورفولوژی خشن تری دارد.



شکل ۲: دو نوع چین خوردگی شامل چروکیدگی و تاخوردگی [۱۶]
Fig. 2: Two kinds of folding involve wrinkles and folds [16]

اکسیدی بیشتر باشد، احتمال وقوع شکست (ترک) ترد در آن نیز بیشتر است. بنابراین می‌توان شکل ظاهری ترک‌های بوجود آمده در یک نمونه را نیز به عنوان یک معیار نسبی از ضخامت لایه اکسیدی در نظر گرفت [۱۹].



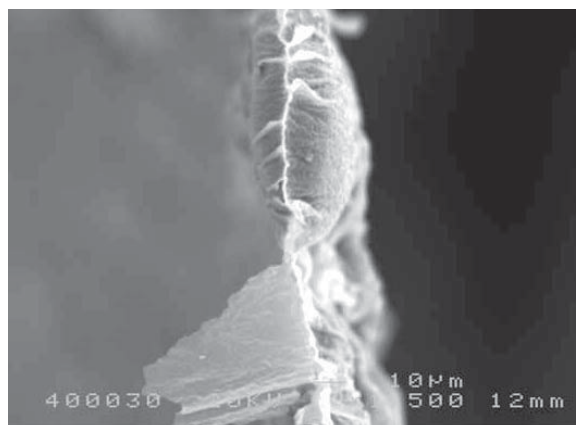
شکل ۴: تشکیل ترک در اثر نمونه‌برداری (ترک نوع ۱) و تنش انقباضی (ترک نوع ۲) در آلومینیم خالص [۱۸]

Fig. 4: Crack formation in pure aluminum due to sampling (Type 1) and contraction stress (Type 2) [18].

روش پژوهش

در این آزمایش، برای تهیه آلیاژهای Al-5Mg و Al-1Mg از شمش آلومینیم خالص و منیزیم خالص استفاده شد. عملیات ذوب و آلیاژسازی با استفاده از یک کوره مقاوم آلومینایی صورت گرفته و ریخته‌گری در درجه حرارت ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام گردید. برای بررسی مورفولوژی سطحی لایه اکسیدی، نمونه‌ها به روش ساندویچ سه لایه اکسید-فلز-اکسید [۱۵] که قبلاً در مورد آلیاژهای آلومینیم و منیزیم مورد آزمایش و استفاده قرار گرفته و نتایج آن گزارش شده است [۷، ۱۵-۱۹] تهیه شد. در این آزمایش، برای برخورداری از مزایای سطح جدایش عمودی قالب، از مدل صفحه‌ای دورو جهت قالب‌گیری استفاده شد (شکل ۵). قالب‌گیری نمونه‌ها با استفاده از ماسه

تا کنون برای تخمین ضخامت فیلم اکسیدی، به صورت تجربی، از نصف کردن ضخامت چروکیدگی و تاخوردگی (عمدتاً تاخوردگی) استفاده شده است. چنانچه چین‌خوردگی مورد بررسی عمود بر سطح تصویر SEM باشد، می‌توان ضخامت آن را به این روش تخمین زد. اما از آن‌جا که مقداری هوا و حتی مذاب در میان آن‌ها به دام می‌افتد، انتخاب این معیار برای اندازه‌گیری ضخامت فیلم اکسیدی جای بررسی بیشتر و انجام عملیات و تحقیقات اصلاحی دارد [۲-۴، ۱۳، ۱۴]. گزارش شده است که بهترین روش تصویری برای اندازه‌گیری ضخامت فیلم اکسیدی، مشاهده ساندویچ اکسید-فلز-اکسید از نمای جانبی (شکل ۳) است [۴]، ولی باید توجه داشت که به خاطر حساسیت و تردی بالای نمونه‌های ساندویچ اکسید-فلز-اکسید، امکان مشاهده جانبی این نمونه‌ها همیشه میسر نیست [۱۸ و ۱۹].

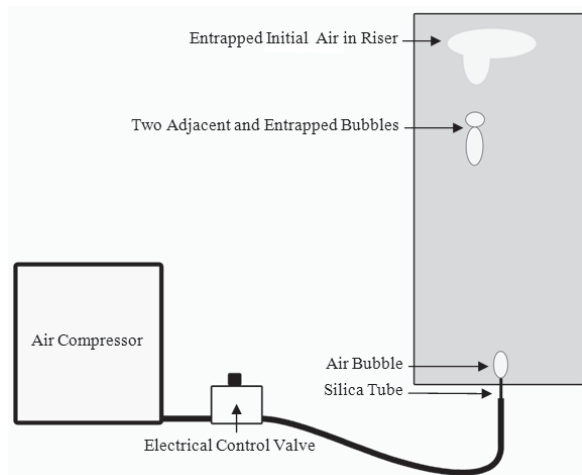


شکل ۳: تصویر ساندویچ اکسید-فلز-اکسید در آلیاژ Al-5Mg از نمای جانبی که نشانگر ضخامت واقعی فیلم اکسیدی دولایه است [۷].

Fig. 3: Oxide-metal-oxide sandwich viewed from its edge [7].

یکی دیگر از خصوصیات فیلم‌های اکسیدی، طبیعت ترد آن هاست. مشاهدات بسیاری مبنی بر حضور ترک در فیلم اکسیدی در آلیاژهای مختلف ارائه شده است. تعدادی از این ترک‌ها در حین نمونه‌سازی و در اثر ارتعاشات ناشی از برش قطعه ایجاد می‌شود، اما برخی نیز در اثر تنش‌های انقباضی ناشی از انقباض خطی فیلم اکسیدی، در حین انجماد به وجود می‌آید (شکل ۴) [۷ و ۱۵-۱۹]. لازم به ذکر است که با توجه به ماهیت سرامیکی اکسید، هرچه ضخامت لایه

۶ نحوه ورود حباب هوا به درون قطعه را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. پس از انجماد و برش قطعات، فصل مشترک حباب‌هایی که به هم رسیده بودند به عنوان نمونه ساندویچ اکسید-فلز-اکسید انتخاب شد و به منظور بررسی مورفولوژی و تخمین ضخامت فیلم اکسیدی، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت.

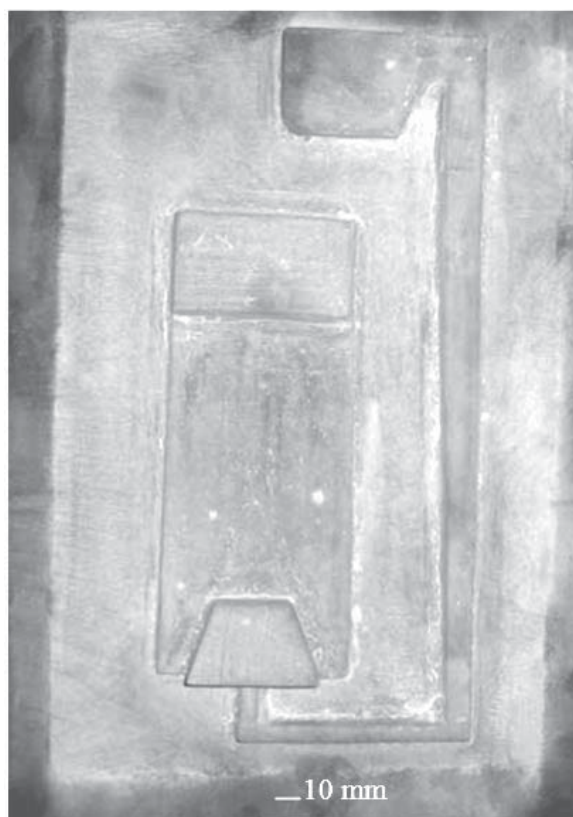


شکل ۶: نمایش شماتیک سیستم دمش هوا به درون قالب
Fig. 6: Schematic of air blowing system

یافته‌ها

بخشی از فصل مشترک دو حبابی که در آلیاژ Al-1Mg به هم رسیده‌اند، در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود و بر اساس گزارش‌های قبلی [۷، ۱۵-۱۹]، فیلم‌های اکسیدی به قدری نازک هستند که ساختار دندردیتی مذاب منجمد شده در میان دو لایه اکسیدی، از میان لایه بالایی قابل مشاهده است. مناطق تیره‌ای (خاکستری پر رنگ) که در فصل مشترک دو حباب دیده می‌شود، همان مذابی است که در میان دو لایه اکسیدی محبوس و منجمد شده است. در منطقه خاکستری در سمت چپ و پایین تصویر، نوک دندردیت‌های مذاب منجمد شده در میان فیلم اکسیدی دو لایه به وضوح دیده می‌شود (تعدادی نوک دندردیت که با هم فصل مشترک دارند، توسط پیکان سفید در شکل ۷ متمایز شده است). در شکل ۷، قسمت‌هایی از ساندویچ

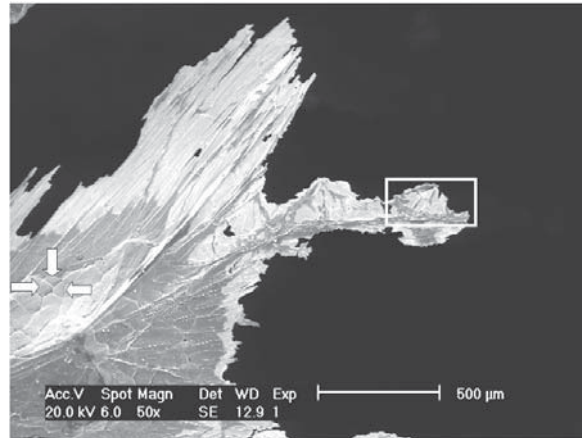
CO₂ و به روش دستی انجام گرفت. برای حصول اطمینان از گرم ماندن لوله دمنده هوا، جلوگیری از انجماد مذاب در اطراف این لوله، انجماد مذاب در لوله و مسدود شدن روزنه خروجی هوا، از سیستم راهگامی کفریز استفاده شد. همچنین به دلیل شیب انجماد (از بالا به پایین قطعه) در سیستم راهگامی کفریز، حباب‌های اولیه با برخورد به مذاب منجمد شده در بالای قطعه، متوقف می‌شوند و در نتیجه حباب بعدی می‌تواند خود را به حباب قبلی برساند. بدین ترتیب احتمال به هم رسیدن حباب‌ها و تشکیل فصل مشترک میان آن‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۵: مدل صفحهای مورد استفاده در آزمایش
Fig. 5: Pattern used in this research.

هوا با فشار ۰/۵ بار توسط یک کمپرسور و شیر کنترل برقی به صورت منقطع از میان لوله سیلیکایی با قطر ۱ میلی‌متر از کف قالب به داخل مذاب دمیده شد. با توجه به ورود منقطع هوا به داخل مذاب (هر حباب با فاصله ۳ ثانیه نسبت به حباب قبل)، حباب‌ها به صورت مجزا وارد قطعه شدند. شکل

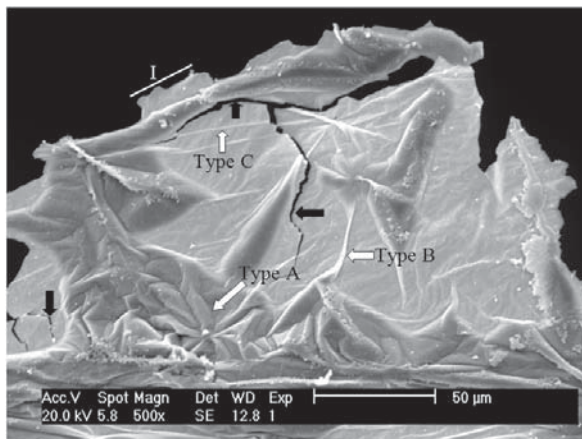
اکسید-فلز-اکسید که در آن دو لایه اکسیدی به هم نزدیک شده‌اند، به رنگ سفید دیده می‌شوند.



شکل ۷: بخشی از فصل مشترک دو حباب به هم رسیده در آلیاژ Al-1Mg که در آن، دندریتهای مذاب محبوس و منجمد شده در میان فیلم دولایه اکسیدی نیز دیده می‌شود.

Fig. 7: The interface between two adjacent bubbles in Al-1Mg alloy, showing dendrites of entrapped and solidified melt between two oxide layers.

احتمال وجود مذاب محبوس در میان تاخوردگی‌های تیره بیشتر است و در نتیجه ضخامت تاخوردگی‌های تیره از مقدار واقعی ضخامت فیلم اکسیدی فاصله زیادی دارد. بدین ترتیب تاثیر منفی پارامتر ضخامت ماده محبوس در میان تاخوردگی بر ضخامت تاخوردگی اکسیدی، تا حد ممکن کاهش خواهد یافت. با توجه به نکات مطرح شده، ضخامت تاخوردگی‌ها در این پژوهش، در محدوده ۰/۵ تا ۱/۲ میکرومتر تخمین زده شده است. بنابراین طبق روش نصف کردن ضخامت چین خوردگی [۷، ۱۵-۱۹]، می‌توان ضخامت تخمینی لایه اکسیدی در آلیاژ Al-1Mg در اکسیداسیون زمان کوتاه، را در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۶ میکرومتر اعلام کرد. مطلب جالب توجه دیگر در تصویر ۸، حضور ترک‌هایی (ترک‌هایی که با پیکان سیاه مشخص شده‌اند) در میان فیلم اکسیدی دولایه است که اختلاف ارتفاع سطح دو طرفشان زیاد است.



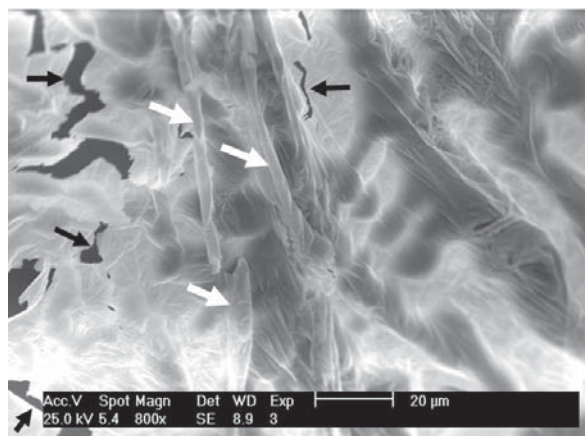
شکل ۸: تصویر با بزرگنمایی بالاتر از کادر مشخص شده در شکل ۷ که نشان‌دهنده ساختار چین خورده فیلم اکسیدی است. این ساختار شامل چین خوردگی حاوی فلز نوع (A)، چروکیدگی اکسیدی نوع (B) و تاخوردگی منتهی به مذاب محبوس در میان فیلم دو لایه نوع (C) است.

Fig. 8: Higher magnification of the framed area in Fig. 7, showing folded structure of oxide film. Folding involves entrapped metal (Type A), wrinkle (Type B) and fold reaches the entrapped metal (Type C) are seen in this structure.

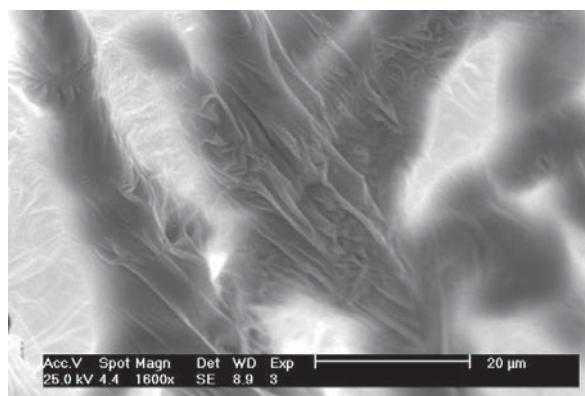
شکل ۹، بخشی از فصل مشترک دو حباب به هم رسیده در آلیاژ Al-5Mg را نشان می‌دهد. طبق این تصویر، به

برای بررسی دقیق‌تر مورفولوژی سطحی فیلم اکسیدی دولایه، کادر سفید مشخص شده در تصویر ۷ با بزرگنمایی بالاتر در شکل ۸ نشان داده شده است. در تصویر ۸، در قسمت‌هایی که حجم بیشتری از مذاب وجود داشته است (مناطق خاکستری پر رنگ)، تعداد زیادی چین خوردگی حاوی مذاب منجمد شده مشاهده می‌شود (چین خوردگی نوع A). در قسمت‌های روشن تصویر، بیشتر چروکیدگی لایه اکسیدی (چین خوردگی نوع B) به چشم می‌خورد، البته تاخوردگی‌هایی (چین خوردگی نوع C) نیز در منطقه روشن ساندویچ اکسید-فلز-اکسید دیده می‌شود که عمدتاً از یک طرف به قطرات مذاب محبوس در میان دولایه اکسیدی رسیده‌اند. برای تخمین ضخامت تاخوردگی اکسیدی در آلیاژ Al-1Mg، ضخامت تاخوردگی‌های عمود بر تصویر در شکل ۸ و سایر تصاویر به دست آمده از این نمونه، با توجه به مقیاس عکس تخمین زده شد. همچنین برای افزایش دقت تخمین، سعی شد از تاخوردگی‌های به رنگ روشن استفاده شود، چرا که

در محدوده ۰/۴ تا ۰/۷ میکرومتر قرار می‌گیرد. در شکل ۱۰- الف نیز ترک‌هایی (ترک‌هایی که با پیکان سیاه متمایز شده‌اند) که ارتفاع سطح دو طرفشان به نسبت زیاد است، دیده می‌شود.



(الف)



(ب)

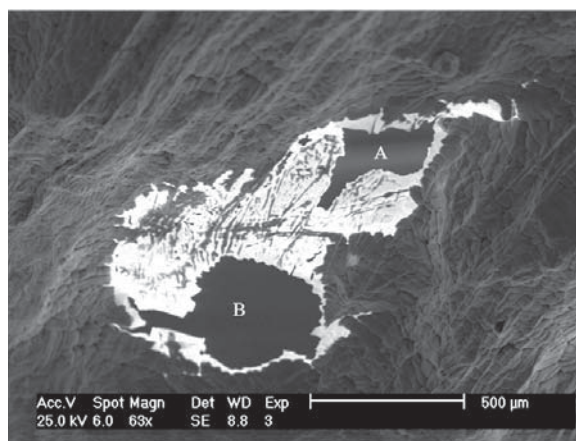
شکل ۱۰: الف) ساندویچ اکسید-فلز-اکسید در آلیاژ Al-5Mg (ب) بزرگنمایی بالاتر از شکل (الف) که نشانگر چین خوردگی‌هاست

Fig. 10: (a) Oxide-Metal-Oxide sandwich in Al-5Mg alloy (b) same image at higher magnification showing folding.

سگالش

در شکل ۱۱ نحوه تشکیل نمونه حاصل از برخورد دو حباب هوا به هم، به صورت شماتیک نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست، در محل برخورد دو حباب به هم در مذاب، ممکن است ۳ حالت مختلف پیش آید که این حالات عبارتند از: گیر افتادن مذاب میان

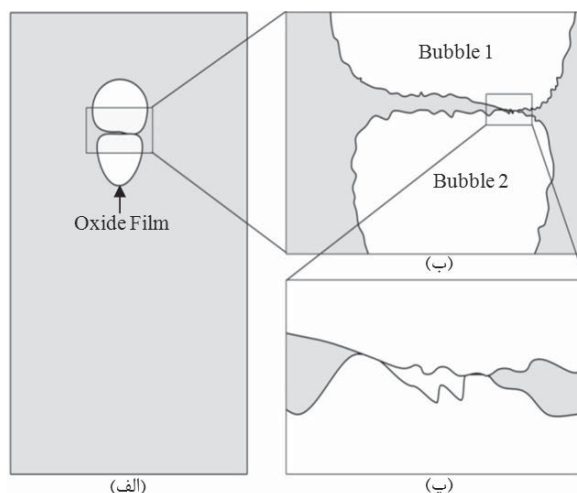
علت کمبود مذاب در قسمت میانی، دو لایه اکسیدی توانسته‌اند به هم برسند و قطراتی از مذاب نیز در میان لایه‌های اکسیدی به دام افتاده است. همان‌طور که در این تصویر مشاهده می‌شود، ساندویچ اکسید-فلز-اکسید در اثر تردی فیلم و شدت ارتعاشات ناشی از برش قطعه در دو منطقه A و B دچار ریزش شده است.



شکل ۹: بخشی از فصل مشترک دو حباب به هم رسیده در آلیاژ Al-5Mg
Fig. 9: The interface between two adjacent bubbles in Al-5Mg alloy

بخشی از ساندویچ اکسید-فلز-اکسید در شکل ۹ با بزرگنمایی بالاتر در شکل ۱۰- الف نشان داده شده است. در این تصویر چند تا خوردگی عمیق حاوی هوای محبوس که در شکل با پیکان سفید مشخص شده است، از نمای جانبی دیده می‌شود. لذا امکان تخمین ضخامت این تا خوردگی‌ها وجود ندارد. قسمت بالایی و سمت راست تصویر ۱۰- الف با بزرگنمایی بالاتر در شکل ۱۰- ب نشان داده شده است. در این تصویر هر دو نوع چین خوردگی شامل تا خوردگی و چروکیدگی به چشم می‌خورد. برای تخمین ضخامت تا خوردگی اکسیدی در آلیاژ Al-5Mg نیز شرایط مطرح شده در تخمین ضخامت تا خوردگی برای آلیاژ Al-1Mg در نظر گرفته شد. بدین ترتیب طبق شکل ۱۰ و سایر نتایج به دست آمده از نمونه‌های ۵ درصد وزنی منیزیم، ضخامت تا خوردگی‌ها در محدوده ۰/۸ تا ۱/۴ میکرومتر تخمین زده شد. در نتیجه با نصف کردن ضخامت تا خوردگی، ضخامت تخمینی لایه اکسیدی

دو لایه اکسیدی (ساندویچ اکسید- فلز- اکسید)، گیر افتادن هوا در میان دو لایه اکسیدی و رسیدن دو لایه اکسیدی به هم.



شکل ۱۱: نمایش شماتیک (الف) رسیدن دو حباب به هم (ب) گیر افتادن مذاب در میان دو لایه اکسیدی چین خورده (پ) رسیدن دو لایه اکسیدی چین خورده به هم و گیر افتادن هوا در میان دو لایه.

Fig. 11: Schematic showing (a) Colliding of two bubbles (b) molten metal entrapped between two folded oxide layers (c) Contact area between two folded oxide layers and air entrapped between two layers.

ضخامت چین خوردگی اکسیدی روش دقیقی برای اندازه گیری ضخامت فیلم اکسیدی جدید نیست [۷، ۱۵-۱۹]. اما این روش می تواند معیار مناسبی برای مقایسه شدت اکسیداسیون در آلیاژهای مختلف و نشان دادن تاثیر پذیری ضخامت، استحکام و مورفولوژی فیلم اکسیدی از عناصر آلیاژی است.

ضخامت چین خوردگی ها در آلیاژهای مختلف که در این کار و سایر تحقیقات [۷، ۱۶، ۱۸] تخمین زده شده اند در شکل ۱۲ ارائه شده است. ضخامت چین خوردگی ها تابع عوامل مختلفی همچون شدت تلاطم مذاب، استحکام و انعطاف پذیری فیلم اکسیدی، میزان ماده محبوس در میان چین خوردگی، شدت اکسیداسیون آلیاژ و غیره است. با دقت در این نمودار، مشخص می شود که با افزایش غلظت منیزیم در آلیاژهای آلومینیم، ضخامت چین خوردگی ها نیز افزایش یافته است. از طرفی در گزارش های مختلف اشاره شده است که افزودن منیزیم به آلومینیم موجب افزایش شدت اکسیداسیون آلیاژ می شود [۲-۷، ۱۸]. همان طور که پیش از این مطرح شد، در این تحقیق ضخامت تا خوردگی هایی تخمین زده شد که ظاهراً ماده محبوس کمتری در میان آنها وجود داشت. از طرفی شرایط بارریزی نیز برای تمام نمونه ها به هم نزدیک بود. در نتیجه تاثیر پارامترهایی مانند ماده محبوس در میان چین خوردگی و شدت تلاطم مذاب بر روی مقایسه ضخامت چین خوردگی در نمونه های مختلف کاهش داده شد. بدین ترتیب عواملی مانند استحکام و انعطاف پذیری فیلم اکسیدی و شدت اکسیداسیون آلیاژ، بیشتر بر روی مقایسه ضخامت چین خوردگی ها در آلیاژهای مختلف موثرند، که این عوامل نیز از خصوصیات خود آلیاژ است که با تغییر غلظت منیزیم تغییر می کنند. لذا با توجه به گزارش هایی که در گذشته مطرح شده است [۲-۷، ۱۸] و دقت در نمودار ۱۲، انتظار می رود که مهمترین دلیل افزایش ضخامت چین خوردگی ها با افزایش غلظت منیزیم در آلیاژهای آلومینیم، افزایش ضخامت فیلم اکسیدی جدید باشد.

گزارش شده است که سیلیسیم تاثیری در ضخامت پوسته اکسیدی در آلیاژهای آلومینیم ندارد [۳]. مطابق شکل ۱۲، ضخامت چین خوردگی ها با افزایش غلظت منیزیم طبق روندی منظم افزایش می یابد. لذا با فرض تاثیر سیلیسیم بر روی ضخامت فیلم اکسیدی در آلیاژهای آلومینیم، می بایست

آنچه که در تصاویر SEM مشاهده شد، سطح بالایی یا پایینی فصل مشترک دو حباب است. به طور کلی همان طور که از شکل ۱۱ پیداست، وقتی لایه اکسیدی چین می خورد، در میان آن یا مذاب گیر می افتد یا هوا، البته مواردی نیز پیش می آید که دو سطح چین خوردگی به هم می رسند و ماده ای در میان دو سطح چین خوردگی گیر نمی افتد. اگر بتوان منطقه ای یافت که دو لایه به هم رسیده اند (منطقه I در شکل ۸) و امکان مشاهده این منطقه از نمای جانبی باشد، ضخامت حقیقی فیلم اکسیدی قابل اندازه گیری خواهد بود.

یکی از روش های تخمین اندازه فیلم اکسیدی، نصف کردن ضخامت چین خوردگی بوده است. معمولاً برای تخمین ضخامت سعی می شود از تا خوردگی هایی استفاده شود که عمود بر صفحه تصویر باشند تا دقت تخمین اندازه افزایش پیدا کند. از آنجا که ضخامت چین خوردگی شامل ضخامت دو لایه اکسیدی و ماده محبوس در میان آنهاست، نصف کردن

ترد آن نیز افزایش می‌یابد. از طرفی مطمئناً تنش‌های مکانیکی و به‌خصوص تنش‌های ناشی از برش قطعه، بزرگ‌تر از تنش‌های انقباضی هستند و در نتیجه تشکیل ترک‌های عمیق‌تر و حتی ریزش فیلم اکسیدی تحت تنش ناشی از برش قطعه با اره محتمل‌تر است.

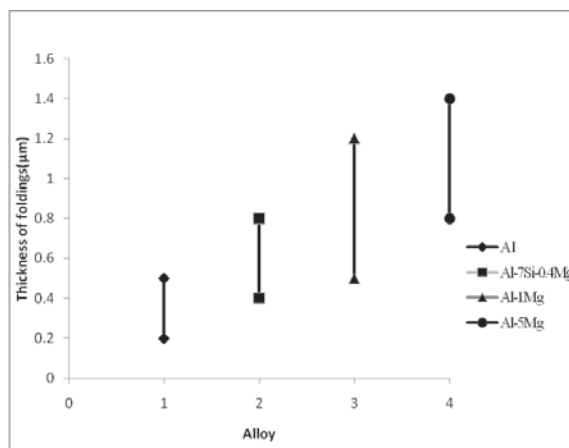
با توجه به شرایط این آزمایش که شامل دمای بالا و مدت زمان اندک (کمتر از ۵ دقیقه برای بارریزی و انجماد کامل قطعه) است و بر پایه گزارش‌های قبلی انتظار می‌رود اکسید آلومینیم کریستالی روی آلومینیم خالص تشکیل شود [۳ و ۲۰]. همان‌طور که در بخش مقدمه گفته شد، در گروه آلیاژی آلومینیم-منیزیم با غلظت‌های کمتر از ۱۰ درصد وزنی منیزیم، اسپینل و اکسید منیزیم می‌توانند تشکیل شوند [۹]. همچنین ذکر شد که در غلظت‌های وزنی کمتر منیزیم، تشکیل اسپینل بر تشکیل اکسید منیزیم ارجح است [۵]. لذا با توجه به شرایط این آزمایش، انتظار می‌رود که فاز سازنده فیلم اکسیدی در آلیاژ Al-1Mg اسپینل باشد. در مورد آلیاژ Al-5Mg نیز حضور همزمان اسپینل و اکسید منیزیم برای تشکیل محتمل‌تر است.

در تحقیقات قبلی نشان داده شده است که با تشکیل اسپینل و افت دما در آلیاژهای آلومینیم، استحکام پوسته اکسیدی نیز کاهش می‌یابد [۳ و ۲۰]. این کاهش استحکام فیلم اکسیدی نیز می‌تواند از عوامل موثر روی ترک خوردن فیلم اکسیدی باشد. بنابراین می‌توان افزایش ضخامت لایه اکسیدی در کنار تغییرات احتمالی ساختار و ترکیب شیمیایی آن در حین انجماد قطعه را به عنوان یکی از دلایل افزایش حساسیت به اکسیداسیون در آلیاژهای آلومینیم-منیزیم با افزایش مقدار منیزیم دانست.

نتیجه‌گیری

- ۱- استفاده از اندازه تخمینی ضخامت چین‌خوردگی‌های اکسیدی معیار مناسبی برای مقایسه شدت حساسیت به اکسیداسیون در آلیاژها (از لحاظ ضخامت لایه اکسیدی تشکیل شده) با تغییر نوع و محتوای عناصر سازنده آنها طی اکسیداسیون زمان کوتاه آلیاژ مذاب است.
- ۲- افزایش مقدار منیزیم در مذاب آلومینیم، افزایش ضخامت

شاهد روندی ناموزون در نمودار ۱۲ باشیم. به عبارت دیگر با قبول این فرض انتظار می‌رود که داده‌های مربوط به آلیاژ Al-7Si-0.4Mg به پایین یا بالا انتقال یابد. در نتیجه بر اساس این نمودار می‌توان اظهار داشت که با تغییر غلظت سیلیسیم در آلیاژهای آلومینیم، ضخامت فیلم اکسیدی تشکیل شده بر روی مذاب تغییری نخواهد کرد.



شکل ۱۲: مقایسه ضخامت تاخوردگی اکسیدی در آلیاژهای مختلف

Fig. 12: Comparison of oxide foldings thickness for different alloys.

در تصاویر ارائه شده، حضور ترک در فیلم اکسیدی به وضوح مشخص است. این نشانگر ترد بودن فیلم‌های اکسیدی جدید است که ضخامت کمی هم دارند. به‌طور کلی عوامل تشکیل ترک را می‌توان به دو دسته تنش‌های مکانیکی و انقباضی تقسیم کرد. تنش‌های مکانیکی در اثر عوامل مختلفی مانند ارتعاشات ناشی از برش قطعه با اره و تلاطم مذاب به وجود می‌آیند. ارتعاش قطعه در طول برش موجب تشکیل ترک‌های عمیق (ترک‌های مورد اشاره در شکل‌های ۸ و ۱۰-الف) و حتی ریزش فیلم اکسیدی (شکل ۹) می‌شود. تنش‌های انقباضی اعمال شده به فیلم اکسیدی که در اثر انقباض خطی فیلم اکسیدی در حین انجماد قطعه به وجود می‌آیند نیز می‌تواند موجب تشکیل ترک‌هایی با طول و ضخامت کم (ترک نوع ۲ در شکل ۴) در فیلم اکسیدی شود. باید توجه داشت که فیلم اکسیدی در زمان تشکیل انعطاف‌پذیری بیشتری داشته و در ادامه در اثر افزایش ضخامت و سرد شدن، مستحکم‌تر می‌شود و احتمال شکست

احتمال ورود هوا به درون مذاب و تشکیل عیوب حاصل از اکسیداسیون و ورود لایه های اکسیدی به درون مذاب، بسیار محتمل است.

چین خوردگی‌ها و فیلم‌های اکسیدی در آلیاژهای آلومینیم-منیزیم را در پی دارد.
۳- با توجه به نتایج ارائه شده، با افزایش غلظت منیزیم، افزایش شدت و تعداد چین خوردگی‌ها و در نتیجه تشدید

مراجع

1. R. Raiszadeh, W. D. Griffiths, "A Method to Study the History of a Double Oxide Film Defect in Liquid Aluminum Alloys", Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 37B, pp-865-871, (2006)
2. J. Campbell, "Castings", Published by Butterworth-Heinemann, Oxford, (2003)
3. W. Thiele, "Oxidation of Melts of Al and of Al Alloys Aluminum", Vol. 38, pp-707-715, (1962)
4. I. M. Ritche, J. V. Sanders, P. L. Weikhardt, "Oxidation of a Dilute Aluminum Magnesium Alloy", Oxidation of Metals, Vol. 3, No. 1, pp-91-101, (1971)
5. J. A. Taylor, "Oxidation, Dross and Melt Loss Issues Involved in The handling of Molten Aluminum Alloys" CAST CRC, University of Queensland Brisbane, QLD 4072, Australia, (2002)
6. O. Ozdemir, J. E. Gruzleski, R. A. L. Drew, "Effect of Low-Levels of Strontium on the Oxidation Behavior of Selected Molten Aluminum-Magnesium Alloys", Oxid Met, (2009)
7. M. Divandari, J. Campbell, "Morphology of Oxide Films of Al-5Mg Alloy in Dynamic Conditions in Casting", International Journal of Cast Metals Research, Vol. 18, No. 3, (2005)
8. E. A. Trofimov, Yu. G. Kadochnikov, "Thermodynamic Analysis of Interaction Processes in the Al-Mg-Na-K-O System at 680-840C", Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2006, No. 4, pp-297-302, (2006)
9. V. M. Sreekumar, K. R. Ravi, R. M. Pillai, B. C. Pai, M. Chakraborty, "Thermodynamics and Kinetics of the Formation of Al₂O₃/ MgAl₂O₄/MgO in Al-Silica Metal Matrix Composite" Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 39A, pp-919-933, (2008)
10. M. Hanabe, P. B. Aswath, "Synthesis of In-Situ Reinforced Al Composites From Al-Si-Mg-O Precursors", Acta mater, Vol. 45, No. 10, pp- 4067-4076, (1997)
11. A. D. McLeod, C.M. Gabryel, "Kinetics of the Growth of Spinel, MgAl₂O₄, on Alumina Particulate in Aluminum Alloys Containing Magnesium", Metallurgical Transactions A, Vol. 23A, pp-1279-1283, (1992)
12. J. C. LEE, J. P. AHN, Z. SHI, J. H. SHIM, H. I. LEE, "Methodology to Design the Interfaces in SiC/Al Composites", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 32A, pp-1541-1550, (2001)
13. J. Campbell, "Entrainment defects", Materials Science and Technology, Vol. 22, No. 2, pp-127-145, (2006)
14. J. Campbell, "An Overview of the Effects of Bifilms on the Structure and Properties of Cast Alloys", Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 37B, pp-857-863, (2006)
15. M. Divandari, J. Campbell, "A New Technique for the Study of Aluminum Oxide Films", Aluminum Transactions, Vol. 2, pp-233-238, (2000)
16. M. Divandari, J. Campbell, "Oxide Film Characteristics of Al-7Si-Mg Alloy in Dynamic Conditions in Casting", International Journals of Cast Metal Research, Vol. 17, No. 3, (2004)
17. A. R. Mirak, M. Divandari, S. M. A. Boutorabi, J. Campbell, "Oxide Film Characteristics of AZ91 Magnesium Alloy in Casting Conditions", International Journal of Cast Metals Research, Vol. 20, No. 4, pp-215-220, (2007)

۱۸. بهزاد نایی، مهدی دیواندری، محمدرضا نعیمی جمال، "بررسی خصوصیات (ضخامت و مورفولوژی) فیلم-های اکسیدی تشکیل شده در مذاب آلومینیم خالص"، انتشارات جامعه ریخته‌گران ایران، شماره ۹۲، بهار و تابستان ۱۳۸۸، ص ۱۲-۱۹

۱۹. بهزاد نایی، "تاثیر میزان کلسیم در مورفولوژی و مشخصات فیلم های اکسیدی نانو و میکرو در آلیاژهای آلومینیم-کلسیم"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران، تابستان ۱۳۸۸

20. M. Syvertsen, "Oxide Skin Strength on Molten Aluminum", Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 37B, pp-495-504, (2006)