IRANIAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY

Founding Research Journal

Nano Double Oxide Film (NDOF) Characteristics of A356 Alloy Casting Protected With Beryllium in Turbulence Conditions

Ali Dehhaghi [1], Seyed Mohammad Ali Boutorabi [2*]

1. M.Sc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.
2. Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.

Received: 14 June 2018
Accepted: 04 October 2018

Abstract:

The effect of beryllium addition (200 ppm and 2000 ppm) on dynamically formed double oxide film of aluminum A356 alloy was investigated. Dynamically double oxide films were obtained by gravity casting in a cup of thin-walled steel at different free fall of melt and solidified under a vacuum of 80 mbar. The melt quality according to the bifilm index for melts containing 2000 ppm of beryllium for molten free fall height of 200 and 300 mm is 5.6 and 5.20 mm, respectively. Scanning electron microscopy (SEM) images show a change in the morphology and thickness of the young double oxides containing the beryllium element in dynamic conditions. By adding 2000 ppm of beryllium, the thickness of the film is reduced. For amount of 200 ppm, the edges of the oxide screed and its greater thickness are oxide film properties. Reducing the thickness can mean increased flexibility of oxide films composed of melt containing beryllium. Also, the radiographic results of RPT samples showed that the cavities were reduced by adding beryllium.

Keywords:
Flexible double oxide film,
Oxide morphology,
Thickness of dynamically oxide film,
Reduce pressure test..

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:
Dehhaghi A., Boutorabi S. M. A., Nano double oxide film (NDOF) characteristics of A356 alloy casting protected with beryllium in turbulence conditions, in Persian, Founding Research Journal, 2018, 2(2) 71-78.
DOI: 10.22034/FRJ.2018.135424.1045

*** Corresponding Author:**
Seyed Mohammad Ali Boutorabi, Professor
Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology,
P.O. Box 16846–13114, Narmak, Tehran, Iran. Tel/Fax: +98 21 77240076.
E-mail: Boutorabi@iust.ac.ir

فصل‌نامه علمی پژوهشی

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

انجمن علمی ریخته‌گری ایران

مشخصه نانو فیلم اکسید دولایه (NDOF) از آلیاژ ریختگی آلومینیم A356 محافظت شده با عنصر بریلیم در شرایط مغشوش

علی ده‌حقی[۱]، سید محمدعلی بوترابی[۲]*

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران . a_dehhaghi@metaleng.iust.ac.ir

۲- استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران. Boutorabi@iust.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۴

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۲

چکیده:

اثر افزودن بریلیم به میزان ۲۰۰ و ۲۰۰۰ppm بر فیلم اکسیدی دولایه آلیاژ آلومینیم A356 تشکیل شده در شرایط دینامیک مورد بررسی قرارگرفت. فیلم‌های دولایه دینامیکی توسط ریخته‌گری ثقلی مذاب در یک فنجان از جنس فولاد زنگ‌نزن جداره نازک در ارتفاع‌های متفاوت بارریزی و انجماد تحت خلاء ۸۰mbar بدست آمد. کیفیت مذاب مطابق شاخص فیلم دولایه برای مذاب‌های حاوی مقدار ۲۰۰۰ppm بریلیم به همراه ارتفاع ذوب‌ریزی ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر، به ترتیب ۶/۵ و ۲۰/۵ میلی‌متر است. بررسی‌های تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان‌گر تغییر مورفولوژی و ضخامت اکسیدهای دولایه جوان حاوی عنصر بریلیم در شرایط دینامیکی است. با افزودن ۲۰۰۰ppm بریلیم ضخامت فیلم دینامیکی تشکیل شده، کاهش یافته است. برای مقدار ۲۰۰ ppm لبه‌های کنگره‌ای اکسید و ضخامت بیشتر آن، از ویژگی‌های فیلم اکسیدی است. کاهش ضخامت می‌تواند به معنی افزایش انعطاف فیلم‌های اکسیدی تشکیل شده از مذاب حاوی بریلیم باشد. همچنین نتایج رادیوگرافی نمونه‌های RPT نشان داد که با افزودن بریلیم حفرات موجود کاهش پیدا کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی:

فیلم اکسیدی دولایه منعطف،

مورفولوژی اکسید،

بریلیم،

آزمایش کاهش فشار

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین عیوب در ریخته‌گری فلزات، عیب فیلم اکسیدی است. در آلیاژهای آلومینیم اغلب فیلم‌های اکسیدی تشکیل شده به صورت شناور در مذاب هستند. این عیب شناور در مذاب، می‌تواند تا مرحله انجماد مذاب باقی بماند و دفن شود. از آنجایی که عیب فیلم اکسیدی منعطف است می‌تواند دچار تاخوردگی شود و فیلم دولایه را به وجود آورد. حذف کامل عیب فیلم دولایه، در تمام روش‌های ریخته‌گری که مذاب سقوط آزاد را تجربه می‌کند، امکان‌پذیر نیست. همچنین این فیلم‌ها به عنوان ترک در فلز جامد شده عمل می‌کنند. بهبود فیلم دولایه با افزودن عنصر آلیاژی یکی از روش‌های مؤثر در کاهش اثرات مضر این ریزترک‌ها و افزایش قابلیت اعتماد و تکثیرپذیری است. از این رو، شناسایی خواص و مورفولوژی اکسیدهای تشکیل شده در مذاب فلزات، می‌تواند گامی برای کنترل آن‌ها باشد، یا اثرات مضر آن‌ها را به حداقل برساند. فیلم تشکیل‌شده آلیاژهای آلومینیم پیچیده است. دما، عناصر آلیاژهای، ناخالصی‌ها و روش‌های آزمایش بر رفتار و رشد اکسیدها موثرند[۱]. یکی از عناصر آلیاژی معمول در آلیاژهای آلومینیم ریختگی، منیزیم است، که تمایل به تشکیل MgO دارد و می‌تواند درون لایه آلومینا جهت تشکیل اسپینل($MgAl_2O_4$) رشد کند و نرخ اکسایش را به شدت افزایش دهد[۲]. عناصری مانند Ti و Cu، نرخ رشد MgO را افزایش می‌دهند و اکسید را ضخیم تر می‌کنند. Zn دوره نهفتگی قبل از جدایی اکسایش را افزایش می‌دهد، یعنی

دوره‌ای که نرخ رشد γ-Al_2O_3 آهسته است و برای دگرگونی به α-Al_2O_3 افزایش می‌یابد [۳].

استحکام پوسته اکسیدی به عنوان یک متغیر امری مهم است. اعتقاد بر آن است که اکسید مستحکم‌تر، ترک‌های محدودتری را تشکیل می‌دهد و محافظت بیشتری دارد[۴،۲]. در این زمینه، افزودن استرانسیم به افزایش استحکام لایه‌های فیلم اکسید دولایه کمک کرده است[۵]. محققین نشان داده‌اند که ضخامت فیلم اکسیدهای اندازه گرفته شده در آلیاژهای گوناگون در زمان‌های نگه‌داری متفاوت برای آلیاژ آلومینیم فوق خالص و آلیاژ Al-5Mg با گذشت زمان، افزایش یافته، در حالی که ضخامت اکسید از آلیاژهای دیگر بعد از یک دوره زمانی حدود ۷ ساعت ثابت بوده است [۶]. برای اندازه‌گیری ضخامت، مورفولوژی و ترکیب شیمیایی فیلم‌های اکسیدی روشی تحت عنوان ساندویچ اکسید- فلز- اکسید (OMO) معرفی شده است. با تخمین عرض چین و چروک‌های کوچک (W) ضخامت فیلم با تقریب W/2 خواهد بود. این روش تنها برای فیلم‌های تاخورده و تیز که به همراه مقادیر جزئی از مذاب گیر افتاده باشند صحیح است. ضخامت فیلم‌های اکسیدی میان دو حباب گیر افتاده در آلیاژ Al-5Mg حدود ۰,۲-۰,۳μm[۷] و این ضخامت در آلیاژهای Al-7Si-0.4Mg ، حدود ۰,۵μm گزارش شده است[۸]. در این تحقیق با سقوط آزاد مذاب در فنجان استیل جداره نازک به بررسی مورفولوژی فیلم‌های اکسیدی در شرایط دینامیکی پرداخته شده است.

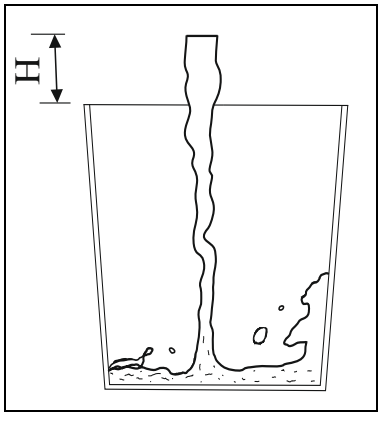
۲- روش تحقیق

برای ذوب آلیاژ از یک بوته سیلیکون کاربایدی پیش‌گرم شده با ظرفیت 5kg استفاده شد. جدول (۱)، نشان دهنده ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق است. افزودن بریلیم توسط آمیژان Al-5Be تحت فلاکس پوششی بود. از فروبر (plunger) با جنس فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده و پیش‌گرم‌شده برای افزودن آمیژان استفاده شد. در تمامی مدت فروبری آمیژان، دمای مذاب ثابت نگه داشته شد. مقدارهای ۲۰۰ و ۲۰۰۰ppm برای افزودن بریلیم انتخاب شد. پس از ذوب و انحلال آمیژان از مذاب مجدداً سرباره‌گیری شد و برای ریخته‌گری دمای ۶۷۰°C انتخاب شد. ریخته‌گری سرریز با ارتفاع‌های متفاوت بارریزی برای تهیه نمونه‌های آزمایش کاهش فشار (RPT)، مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور مقدار ۱۰۰gr مذاب توسط یک فنجان از فولاد زنگ‌نزن جداره نازک در خلاء ۸۰mbar منجمد شد. برای یکسان بودن هیدروژن اولیه، نمونه‌های هیچ یک از مذاب‌ها گاززدایی نشده‌اند. بعد از انجماد نمونه‌های RPT، توسط کاتر برش‌کاری و سپس شست‌وشو داده و برای آزمایش رادیوگرافی (RT) توسط اشعه ایکس آماده شدند.

شکل(۱)، چگونگی پرشدن فنجان‌های استیل جداره نازک را نشان می‌دهد که در آن H، ارتفاع سقوط آزاد مذاب است و مقادیر ۰، ۱۲، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر برای آن لحاظ شده است. برای ارتفاع بارریزی صفر میلی‌متر، نمونه‌برداری مستقیماً از داخل بوته صورت گرفت.

برای مشاهده و بررسی فیلم‌های اکسیدی دینامیکی، حفرات موجود در آزمایش کاهش فشار توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. تعیین ترکیب فیلم‌های اکسیدی توسط طیف‌سنجی انرژی پراش (EDS) انجام شد.

برای بدست آوردن شاخص فیلم اکسیدی، سطوح نمونه‌های آزمایش RPT توسط یک دوربین عکس‌برداری با قدرت تفکیک ۶۰۰ppi در نور یکنواخت برای شمارش حفرات و بدست آوردن میانگین قطر حفرات، تصویربرداری شد. سپس این تصویرها به فرمت باینری تبدیل شده و با تعریف سطوح خاکستری توسط نرم‌افزار MATLAB®، قطر و تعداد حفرات بدست آمد. نمونه‌ای از حفره‌های شناسایی شده جهت اندازه‌گیری توسط نرم‌افزار در شکل (۲) آمده است.



شکل ۱- طرح‌واره چگونگی سقوط آزاد مذاب در نمونه‌های آزمایش کاهش فشار.

شاخص فیلم اکسیدی دولایه توسط رابطه (۱) بدست می‌آید [2]:

$$\text{Bifilm index} = \sum(\text{pore length}) \qquad (۱)$$

که طول حفره (Pore length) به صورت رابطه (۲) بدست می‌آید و واحد اندازه آن برحسب میلی‌متر است:

(۲) میانگین حداکثر قطر حفرات × تعداد کل حفرات= طول حفره

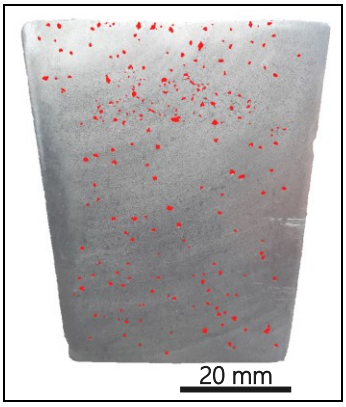
۳- نتایج

ریزنگار میکروسکوپ الکترونی روبشی از فیلم اکسید حفرات آزمایش کاهش فشار در شکل (۳) آمده است. این شکل، قله‌های دندریتی را نشان می‌دهد که توسط یک فیلم اکسیدی ضخیم پوشیده شده است. مساحت پوشیده شده قله‌ها توسط این اکسید پیوسته، می‌تواند نشان دهنده میزان انعطاف‌پذیری اکسید تشکیل‌شده در ارتفاع بارریزی ۳۰۰mm باشد. مقایسه دو تصویر الف و ب در شکل (۳) نشان می‌دهد که اکسید شکل (ب) دارای چروک‌های بیشتری در نوک قله‌های دندریتی هستند.

فیلم اکسید آلیاژ A356 در یکی از حفرات نمونه آزمایش RPT در شکل (۴) آمده است. این اکسید برای مذابی است که از ارتفاع ۳۰۰mm در فنجان رها شده است.

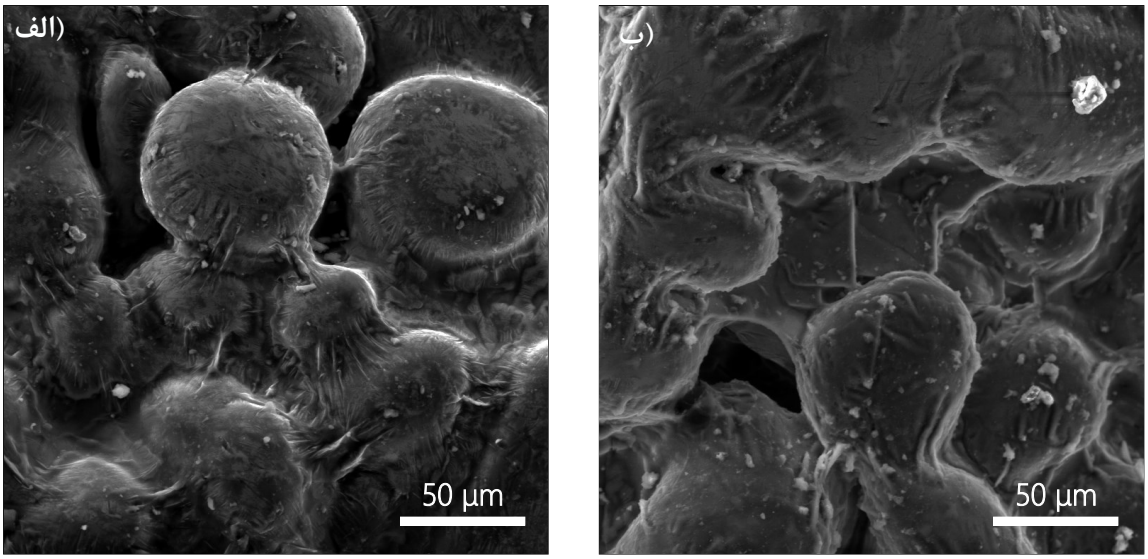
جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده (درصد وزنی).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Ti	Al
7.18	0.17	0.03	0.03	0.28	0.02	0.09	0.01	0.01	**Bal.**

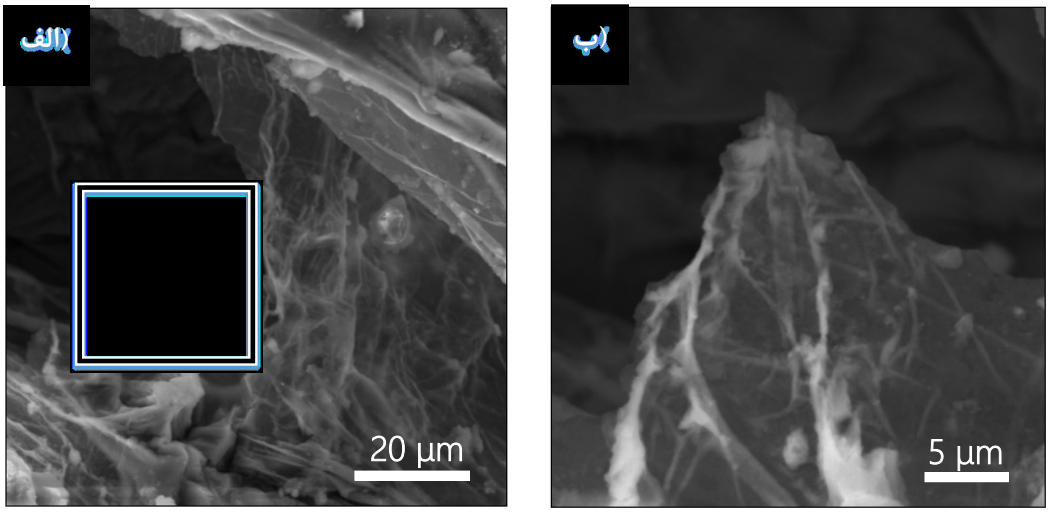


شکل ۲- نمونه RPT تحلیل شده با نرم افزار برای شناسایی حفرات و بدست آوردن شاخص فیلم اکسیدی.

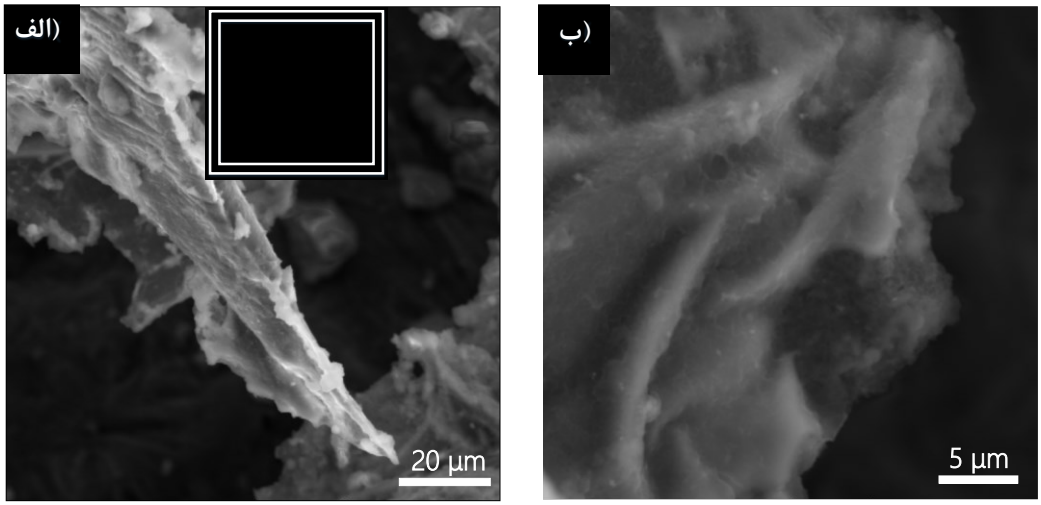
شکل (۵)، اکسیدی را به نمایش می‌گذارد که حاوی ۲۰۰ppm بریلیم است. ارتفاع بارریزی آن ۳۰۰mm بوده است. لبه‌های کنگره‌ای اکسید و ضخامت بیشتر آن، از ویژگی‌های این اکسید است. شکل (۶)، یک اکسید دولایه به همراه ساندویچ OMO را نشان می‌دهد. در شکل (۶)، ضخامت در اکسیدهای تشکیل‌شده حاوی بریلیم (روش نصف ضخامت فیلم تاخورده)، در حدود نانومتر است.



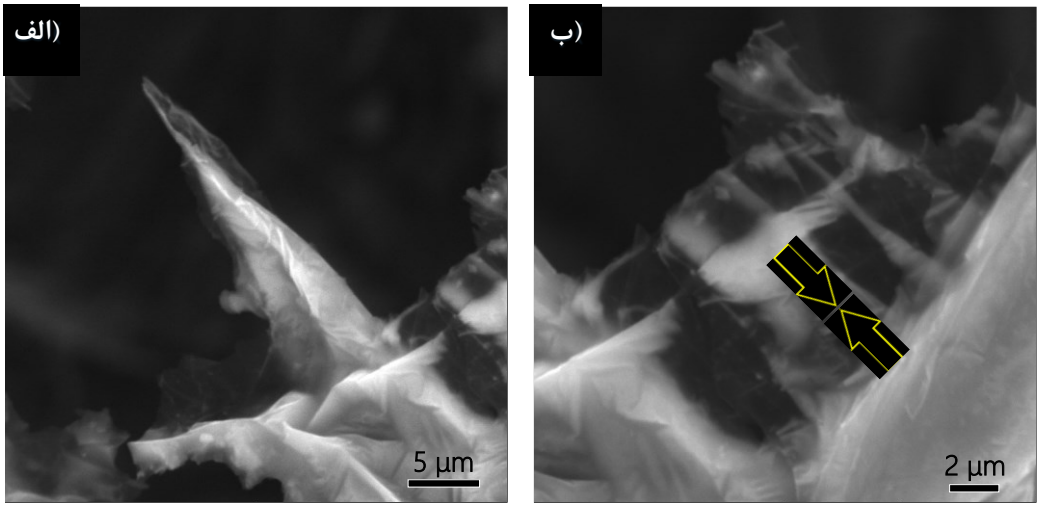
شکل ۳- فیلم اکسیدی افتاده بر روی قله‌های دندریتی – ارتفاع بارریزی ۳۰۰mm حاوی مقادیر: الف) ۲۰۰۰ppmبریلیم، ب) ۲۰۰ppmبریلیم.



شکل ۴- فیلم اکسیدی مشاهده شده در حفره‌های موجود در نمونه RPT آلیاژ A356، ارتفاع بارریزی ۳۰۰mm.



شکل ۵- الف) نگاه از بالا به یک اکسید مشاهده شده در نمونه حاوی ۲۰۰ ppm بریلیم و ارتفاع بارریزی ۳۰۰mm،
ب) نگاه نزدیک از قاب نشان داده شده در شکل (الف).



شکل ۶- فیلم اکسیدی داخل یک مک هیدروژنی آلیاژ حاوی ۲۰۰۰ppmبریلیم در آزمایش RPT ارتفاع بارریزی ۲۰۰mm :
الف) فیلم اکسید تابیده شده، ب) نشانه‌های فرعی به همراه چین خوردگی.

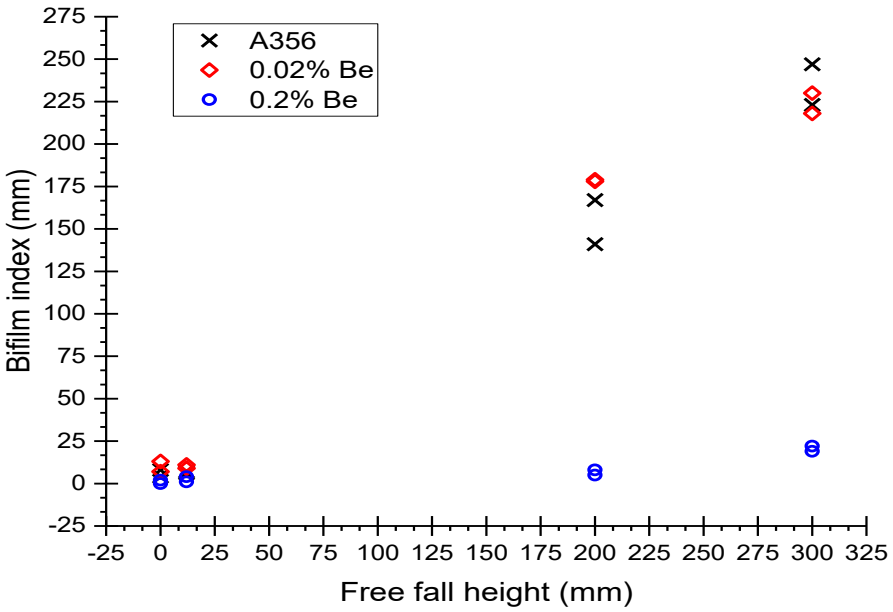
شکل (۷)، شاخص فیلم دولایه را برحسب ارتفاع سقوط مذاب در فنجان‌ها نشان می‌دهد. در ارتفاع صفر میلیمتر و ارتفاع بحرانی تشکیل فیلم دولایه (۱۲mm)، مذاب‌های حاوی بریلیم، شاخص‌های کمتری از خود نشان داده‌اند. در ارتفاع بارریزی ۲۰۰mm برای آلیاژ حاوی ۲۰۰۰ppm بریلیم مقاومت همچنان وجود داشته و شاخص بسیار کمتری نسبت به دیگر آلیاژها دارد. در ارتفاع بارریزی ۳۰۰mm نمونه‌های مذاب حاوی ۲۰۰ ppm بریلیم فرق چندانی با نمونه‌های بدون بریلیم ندارد؛ اما در نمونه حاوی ۲۰۰۰ppm بریلیم شاخص ۲۵ mm است. افزودن مقدار ۲۰۰۰ppm بریلیم، برای مذابی که سقوط آزاد ارتفاع ۳۰۰ mm تجربه می‌کند، شاخصی در حد مذاب با کیفیت عالی دارد.

شکل (۸)، تصاویر رادیوگرافی از نمونه‌های آزمایش کاهش فشار، برای مقدار بریلیم افزوده شده و آلیاژ شاهد است. حفرات موجود در این نمونه‌ها معمولاً به صورت جوانه‌زنی هتروژن تشکیل می‌یابند و فیلم‌های دولایه مکان مناسبی برای جوانه‌زنی هستند. به همین دلیل اغلب سطوح داخلی این حفرات پوشیده از اکسید است (شکل (۳) را ببینید). از این رو، حفرات موجود در نمونه‌های آزمایش کاهش فشار، معیاری برای معرفی آنها به عنوان اکسیدهای دولایه باز شده هستند. با افزودن مقدار جزئی و کم بریلیم، فیلم‌های دولایه کمتری در نمونه‌های تهیه شده به همراه اغتشاش دیده می‌شود. در ارتفاع بارریزی ۳۰۰mm به همراه مقدار کم بریلیم، فیلم دولایه کمتری دیده می‌شود.

۴- بحث و بررسی

الف: کاهش ضخامت، افزایش انعطاف پذیری فیلم اکسیدی دولایه

بررسی‌های ترمودینامیکی و تجربی تشکیل اکسید اسپینل و منیزیم، نشان داده است که در حالت معمول ریخته‌گری، این اکسیدها می‌توانند بوجود آیند. بریلیم با حذف اکسید اسپینل و MgO و یا تشکیل MgO-BeO در لایه اکسید، می‌تواند ضخامت فیلم اکسید را کاهش دهد [۹]. کاهش ضخامت در اکسیدها معمولاً با افزایش انعطاف‌پذیری آنها است. فیلم اکسید آلیاژ A356 دریکی از حفرات نمونه آزمایش RPT در شکل (۴) آمده است. این اکسید برای مذابی است که از ارتفاع ۳۰۰mm در فنجان رها شده است. چروک‌های ریز طبیعی از فیلم‌های اکسیدی به رفتار سیال فلز مذاب بعد از تشکیل آن‌ها وابسته است[۱۰]. مواد اکسیدی هنگامی که به ضخامت‌های کم می‌رسند، انعطاف‌پذیری بیشتری پیدا می‌کنند. درهم تنیدگی این فیلم، نشان از انعطاف این فیلم ضخیم دارد. چروک‌های سطحی نیز این امر را تأیید می‌کند؛ اما در قاب نشان داده‌شده در شکل (۴) - نگاه نزدیک آن نیز گذاشته شده- گوشه‌های تیز این اکسید، بیان‌گر یک شکست نرم از اکسید نیست. شاید بتوان گفت اکسید این آلیاژ در جهت ضخامت انعطاف خوبی از خود نشان می‌دهد؛ اما در دو جهت صفحه‌ای خود ترد است. این یک مفهوم جدید در این زمینه است و نیاز به بررسی بیشتری دارد.



شکل ۷- نمودار ستونی پراکنده از شاخص فیلم دولایه و ارتفاع بارریزی نمونه‌ها برای آلیاژ A356 حاوی بریلیم.

شکل ۸- تصاویر X-ray نمونه‌های آزمایش RPT سرریز برای آلیاژ A356 و مقادیر افزوده شده Be.

ب: افزایش استحکام فیلم اکسیدی دولایه با حضور عنصر بریلیم

بریلیم می‌تواند با پیوستن به اکسید موجود در مذاب به افزایش استحکام اکسید کمک کند [۱۱-۱۳]. این افزایش استحکام شاید بتواند پیوند لایه میانی اکسید را افزایش دهد. استحکام‌بخشی به فیلم‌ها اکسیدی با افزایش انرژی سطحی و تشکیل ترکیبات سطحی پیچیده نظیر $BeO\text{-}Al_2O_3$، ناشی از افزودن Be است [۱۱]. این دلیلی بر کاهش فیلم‌های دفن شده در مذاب توسط افزودن Be است که نتیجه آن افزایش قابلیت اعتماد بوده است [۱۴]. اکسید موجود در مذاب آلیاژ A356 شامل اکسیدهای γAl_2O_3، $MgAl_2O_4$ و MgO است. در صورتی که با افزون ۲۰۰ppm بریلیم، تشکیل آنها امکان‌پذیر نیست[۱۵]. شاید بتوان گفت با افزایش استحکام فیلم اکسید امکان تشکیل عیوب قابل دفن کاهش پیدا کند.

۵- نتیجه‌گیری

۱- با تغییر ترکیب فیلم اکسید توسط عنصر بریلیم، ضخامت در این فیلم‌ها کمتر شده و انعطاف‌پذیری افزایش می‌یابد.

۲- شاخص فیلم دولایه با افزودن ۲۰۰۰ppm بریلیم در شرایط مذاب آرام تا مغشوش، افزایش چندانی نداشته است.

۳- بریلیم با نفوذ به اکسید فیلم دولایه می‌تواند باعث افزایش استحکام فیلم دولایه شود که در نتیجه آن ممکن است احتمال دفن عیوب کاهش یابد.

نکته ایمنی و بهداشتی

اکسید بریلیم و دیگر ترکیبات آن حین ذوب، ماشین‌کاری، سنگ‌زنی، برش‌کاری و جوش‌کاری برای افراد خطرناک محسوب می‌شوند؛ که ممکن است بیماری‌های مزمن ریوی (مانند بریلیوسیس) ایجاد کند. از این رو، در آلیاژهای حاوی

مقادیر کم بریلیم، نکات بهداشتی جهت کاهش خطرات این عنصر سمی از سوی اداره کل ایمنی و سلامت شغلی (OSHA) ارائه شده است [۱۶].

مراجع

[1] Hinton E.M., The oxidation of liquid aluminium and the potential for oxides in grain refinement of aluminium alloys, Thesis: University of Birmingham, August, 2014.

[2] Dispinar D., Campbell J., Critical assessment of reduced pressure test. part 2: Quantification, Cast Metals Research, 2004, 17(5) 287-294,.

[3] Zeng X., Wang Q., Lu Y., Ding W., Zhu Y., Zhai C., Lu C., Xu X., Behavior of surface oxidation on molten Mg–9Al–0.5Zn–0.3Be alloy, Materials Science and Engineering A, 2001, 301, 154-161.

[4] Fox S., Campbell J., Visualisation of oxide film defects during solidification of aluminium alloys, *Scripta Materialia,* 2000, 43, 881-886,.

[5] Glazoff M.V., Rashkeev S.N., Beryllium adsorption at transition aluminas: implications for environmental science and oxidation of aluminum alloys, J. Phys. Chem. C, 2010, 114, 14208–14212.

[6] Asadian-Nozari M., Taghiabadi R., Karimzadeh M., Ghoncheh M.H., Investigation on beneficial effects of beryllium on entrained oxide films, mechanical properties and casting reliability of Fe-rich Al–Si cast alloy, Materials Science and Technology, 2015, 31(4) 506-512.

[7] Lee J. K., Byun J. S., Kim M.H., Effects of beryllium on the Characteristics of Oxide Film in the Al-Si-Mg Alloy, Kor. Inst. Met. & Mater, 2000, 38(1) 219-225.

[8] in Metals Handbook, Tenth ed., ASM International Handbook Committee, 1990, 1238.

[9] Bergsmark E., Simensen C.J., Kofstad C., Oxidation of molten aluminum, Mat. Sci. Eng. A, 1989, 120, 91-95.

[10] Agema K.S., Fray D.J., Preliminary investigation on the deformation behaviour of an oxide scale on molten aluminium, Department of Material Science and Metallurgy, University of Cambridge, 1989.

[11] Drouzy M., Mascré C., The oxidation of liquid non-ferrous metals in air or oxygen, Metall. Rev,1969, 14, 25-46.

[12] Kahl W., Fromm E., Examination of the strength of oxide skins on aluminum alloy melts, Metallurgical Transactions B, 1985, 16(1) 47-51.

[13] Divandari M., Campbell J., Morphology of oxide films of Al–5Mg alloy, Cast Metals Research, 2005, 18, 187-192.

[14] Blackburn P.E. and Gulbransen E.A., Aluminum reactions with water vapor, dry oxygen, moist oxygen, and moist hydrogen between 500 and 625°C, Electrochem. Soc, 1960, 107, 944-950.

[15] Syvertsen M., Oxide skin strength on molten AA5XXX aluminum alloy—effect of beryllium and alternatives, The Minerals, Metals & Materials Society, 2017, 1451-1455.

[16] Wikle K.G., Improving aluminum castings with beryllium, in AFS Transactions, Pennsylvania, April, 1978.

[17] Zeng X. Q., Wang Q. D., Lu Y. Z., Ding W. J., Lu C., Zhu Y. P., Zhai C.Q., Xu X. P., Kinetic study on the surface oxidation of the molten Mg-9Al-0.5Zn-0.3Be alloy, Materials Science, 2001, 36, 2499-2504.

[18] Divandari M., Campbell J., Oxide film characteristics of Al–7Si–Mg alloy, Cast Met Res, 2004, 17, 182-186.

[19] Bartar-Esfahani H., Raiszadeh R., Doost-mohammadi H., The effect of strontium on the strength of layers of double oxide film defects, Metall and Mater Trans A, 2016, 47A, 1331-1338.