

تأثیر پوشش حاوی نانو ذرات سرامیکی بر عیوب داخلی قطعات جداره نازک آلومینیومی ریخته گری شده به روش ثقلی

منصور برونی^{۱*}، بهزاد نیرومند^۲، محمد حسین فتحی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

* m.mahmoudsalehi@ma.iut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۲۳، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۲/۱۱)

چکیده

از مشکلات به وجود آمده در ریخته گری ثقلی قطعات آلومینیومی می‌توان به عیوب حجمی داخلی اشاره کرد. مهم‌ترین عیوب حجمی داخلی، عیوب گازی و انقباضی می‌باشند که در حین انجماد مذاب تشکیل شده و کیفیت قطعات تولیدی را به شدت کاهش می‌دهند. این عیوب اثرات نامطلوبی بر خواص مکانیکی قطعات ریخته‌گاری با دیواره‌های نازک دارد. در این پژوهش، پوشش حاوی نانو ذرات سرامیکی بر روی قالب ماسه‌ای اعمال و تأثیر نوع پوشش قالب بر کاهش عیوب مذکور بررسی شد. آشکارسازی عیوب در قالب‌های ماسه‌ای دارای پوشش حاوی نانو ذرات سرامیکی به وسیله رادیوگرافی پرتو ایکس انجام گردید. جهت مقایسه، این آزمون روی پوشش‌های اعمال شده از نوع میکرو سرامیکی، گرافیتی و هم‌چنین قالب ماسه‌ای بدون پوشش نیز انجام گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که بیشترین مقدار عیوب گازی و انقباضی در قطعات ریخته شده از جنس آلیاژ آلومینیوم AL4-1 در قالب‌های بدون پوشش و کمترین مقدار این عیوب در قالب‌های پوشش داده شده با نانو ذرات سرامیکی ایجاد شده است. به نظر می‌رسد کاهش این عیوب در قطعات ریخته شده در قالب‌های پوشش داده شده با نانو ذرات سرامیکی به دلیل پایداری حرارتی و شیمیایی بالا و سرعت انتقال حرارت بالاتر این پوشش باشد. این نتایج می‌تواند امکان تولید قطعات با کیفیت بالاتر از جنس آلیاژهای آلومینیوم را با استفاده از فناوری نانو تسهیل نماید.

واژه‌های کلیدی:

آلیاژ آلومینیوم AL4-1، پوشش نانو سرامیکی، قطعات جداره نازک، عیوب گازی، عیوب انقباضی

۱- مقدمه

۹ الی ۱۰/۵ درصد سیلیسیوم، ۰/۲۵ الی ۰/۳۵ درصد منگنز و حدود ۰/۲۳ الی ۰/۳ درصد منیزیم می‌باشد [۱-۲]. این آلیاژ با

آلیاژ AL4-1 یک آلایاژ آلومینیوم-سیلیسیوم است که طبق استاندارد دولتی کشور روسیه به شماره GOST 1583-89 دارای

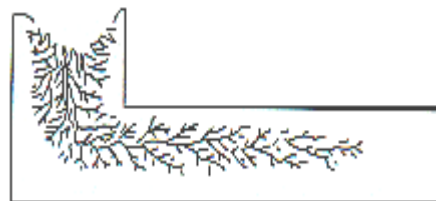
از جمله عوامل مؤثر بر ایجاد عیوب گازی و انقباضی، قابلیت ریخته گری و سیالیت مذاب می‌باشد. قابلیت ریخته گری یک فلز، توانایی آن در ریخته گری یک قطعه فاقد عیوب با خواص نهایی مطلوب را بیان می‌کند [۶]. لازم به ذکر است پدیده‌های مختلفی مرتبط با قابلیت ریخته گری مذاب می‌باشند که از آن جمله می‌توان به پر شدن قالب^۷، سیالیت، مذاب رسانی^۸، تخلخل^۹، جدایش ماکروسکوپی^{۱۰} و ترک گرم^{۱۱}، اشاره نمود [۷]. سیالیت در علم ریخته گری، تحت عنوان توانایی سیلان فلز مذاب در یک قالب استاندارد قبل از توقف توسط انجماد، تعریف می‌شود [۸]. از جمله عوامل مؤثر بر سیالیت مذاب و سلامت قطعه ریخته‌گزی، نوع پوشش قالب می‌باشد. پوشش قالب‌های ریخته گری عموماً از جنس پوشش‌های گرافیتی و یا سرامیکی می‌باشد. پوشش می‌تواند بر عواملی چون سیلان بهتر مذاب به داخل قالب و در نتیجه پر کردن آسان تر قالب و کاهش ضریب اصطکاک قالب تأثیر گذار باشد. تنش سطحی عاملی مضر در پس زدن مذاب و جلوگیری از پر شدن قالب‌های جدا نازک با ضخامت‌های ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر بوده و مانند یک فشار و نیروی پس زننده مذاب عمل کرده و کاهش سیالیت را به دنبال دارد. بهترین روش برای کاهش اثرات پدیده تنش سطحی، پوشش دادن سطح قالب می‌باشد که با فراهم آوردن یک سطح صاف و کاهش زبری سطح قالب، باعث کاهش اصطکاک بین مذاب و دیواره قالب می‌شود. بعضی از پوشش‌ها با انجام واکنش‌هایی که ترشوندگی در فصل مشترک مذاب/قالب را کاهش می‌دهند، باعث بهبود سیالیت می‌شوند [۹-۱۳].

پوشش‌های رایج مورد استفاده در قالب‌های ریخته گری دارای ذراتی با ابعاد میکرونی یا بزرگتر هستند. تحقیقات اخیر نشان داده است که ذرات با ابعاد نانومتری خواصی متفاوت و عموماً بهتر از ذرات میکرونی دارند. متداول‌ترین و پر کاربردترین نانوذرات، نانوذرات سرامیکی هستند. سرامیک‌های نانو، سرامیک‌هایی هستند که اندازه ذرات یا اجزای سازنده آن‌ها حداقل در یک بعد کمتر از حدود صد نانومتر باشد [۱۴]. به نظر می‌رسد پوشش‌های نانو سرامیکی داده شده بر سطح قالب، به

توجه به چگالی کم و خواص مکانیکی بالا، جهت ساخت بسیاری از قطعات پیچیده و جدا نازک^۱ هوایی و هوافضایی کاربردهای فراوانی دارد. از جمله عیوب حجمی که هنگام ریخته گری این آلیاژ بوجود می‌آیند و تأثیر مخربی بر خواص قطعات دارند، حفره‌های گازی و انقباضی می‌باشند [۱-۳].

حفره‌های گازی^۲، حفره‌های گرد یا کشیده‌ای می‌باشند که دارای دیواره‌های صاف بوده و به شکل خوشه‌ای یا پراکنده در سراسر قطعه ریخته‌گزی ایجاد می‌شوند. تخلخل‌های گازی^۳، حفره‌های ریزی هستند که معمولاً در تمام ضخامت قطعه ریخته‌گزی توزیع می‌شوند. به طور کلی عیوب گازی، می‌توانند در اثر رطوبت قالب، آزاد شدن گاز از فلز مذاب و یا حبس مکانیکی هوا در محفظه قالب تشکیل گردند [۴-۵].

حفره‌های انقباضی^۴ زمانی ایجاد می‌شوند که در یک مقطع از قطعه ریخته‌گزی، مذاب رسانی ناکافی بوده و انقباض مذاب به طور کامل جبران نشود. حفره‌های انقباضی در فیلم رادیوگرافی به صورت نواحی تاریک با ابعاد نامنظم و شکل نامشخص ظاهر می‌شوند. حفره‌های انقباضی بر عکس حفره‌های گازی سطوح صاف و براق نداشته و کم و بیش حالت پراکندگی و سطوح دندریتی دارند. حفره‌های انقباضی بر حسب این که فلز با چه سرعتی منجمد گردیده است، می‌توانند شکل‌های مختلفی همچون حفره کشیده، اسفنجی و رشته‌ای به خود بگیرند [۵-۶]. تخلخل اسفنجی^۵ در آلیاژهای با دامنه انجماد طولانی^۶ و با گرادیان حرارتی به مقدار کافی زیاد، اما مذاب رسانی ناکافی توسط تغذیه ایجاد می‌شود [۶]. نمای شماتیک تخلخل اسفنجی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): شماتیک تخلخل اسفنجی [۶].

یوتکتیکی آلیاژ دارد و مذاب را از هوا و دیگر واکنش‌های شیمیایی حفاظت می‌کند [۱۷-۱۹].

جدول (۱): ترکیب شیمیایی استاندارد [۱-۲] و واقعی آلیاژ AL4-1 (درصد وزنی).

اندازه گیری شده	استاندارد	عنصر شیمیایی (wt.%)
۱۰	۹-۱۰/۵	Si
۰/۳	۰/۲۵-۰/۳۵	Mn
۰/۲۵	۰/۲۳-۰/۳	Mg
۰/۱	۰/۰۸-۰/۱۵	Ti
<۰/۶	≤۰/۶	Others
باقیمانده	باقیمانده	Al

جدول (۲): ترکیب شیمیایی فلاکس مورد استفاده در این پژوهش (درصد وزنی) [۱۹].

مقدار (wt%)	ترکیبات
۴۵	NaCl
۴۵	KCl
۵	LaF ₃
۵	دیگر ترکیبات

مقدار ۰/۰۵٪ استرانسیم توسط آمیزان Sr-۱۰٪، Al، حدوداً ۳ دقیقه قبل از اتمام گاززدایی به مذاب اضافه شد تا بهترین اثر و کمترین اتلاف را داشته باشد. به منظور جوانه زایی، مقدار ۰/۲٪ تیتانیم توسط آمیزان Al-۵Ti-۱B همزمان با آمیزان استرانسیم به مذاب اضافه شد. آمیزان تیتانیم نیز همانند آمیزان استرانسیم در اواخر مرحله گاززدایی به مذاب اضافه می‌شود، تا ریز شدن دانه‌ها با کمترین اتلاف مواد جوانه‌زا انجام شود. عناصر بریلیم و استرانسیم به منظور بهبود خواص و سیالیت مذاب به آن اضافه شد. عنصر بریلیم باعث محافظت ذوب در مقابل اکسیداسیون مذاب و جلوگیری از سوختن و اتلاف عناصر آلیاژی فعال، مثل منیزیم می‌گردد [۱-۴]. عنصر استرانسیم باعث اصلاح فاز سیلیسیوم یوتکتیک و بهینه‌سازی شکل فاز سیلیسیوم یوتکتیک

علت ایجاد صافی سطح بالا، دارای سطحی مناسب‌تر و ضریب اصطکاک بسیار پایین‌تر هستند. هم‌چنین به دلیل پایداری حرارتی و شیمیایی بالا، در اثر پیوندهای یونی و کووالانسی مواد سرامیکی، این پوشش‌ها دارای خواص ضد چسبیدن به قطعه بوده و باعث بهبود کیفیت سطحی بالای قطعات ریخته شده در قالب ماسه‌ای و نیز بهبود خواص مکانیکی به علت کیفیت سطحی عالی قطعات شوند [۱۵-۱۶].

در این پژوهش، تأثیر استفاده از پوشش‌های حاوی نانو ذرات سرامیکی اعمال شده روی سطح قالب ماسه‌ای، بر کاهش عیوب داخلی قطعات جداره نازک از جنس آلیاژ آلومینیوم AL4-1 ریخته‌گری شده به روش ثقلی بررسی و با قطعات ریخته‌گری شده با استفاده از پوشش‌های سرامیکی میکرونی، پوشش‌های متداول گرافیتی و بدون پوشش مقایسه شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

در انجام این پژوهش از شمش‌های آلومینیوم AL4-1 ساخت شرکت آمیزه‌ساز اراک استفاده شد. ترکیب شیمیایی این شمش‌ها به روش کوانتومتری تعیین و در جدول (۱) آورده شده است. هم‌چنین در این جدول برای مقایسه، ترکیب شیمیایی استاندارد این آلیاژ نیز ارائه شده است. در هر آزمایش، مقدار ۱۸۰ کیلوگرم از آلیاژ در کوره مقاوم‌تی دارای بوت‌ه گرافیتی ذوب گردید. جهت انجام عملیات کیفی روی مذاب، مقدار ۰/۰۵٪ بریلیم به کمک آمیزان Al-۵Be در ابتدای شارژ نمودن کوره اضافه گردید. سپس فلاکس زنی مذاب به مدت ۱۰ دقیقه توسط دستگاه گاززدایی چرخشی^{۱۲} به کمک ترکیبی از کلرید سدیم^{۱۳}، کلرید پتاسیم^{۱۴} و فلوراید لانتانیم^{۱۵} انجام شده و در پایان، گاززدایی مذاب به مدت ۲۰ دقیقه با استفاده از گاز آرگون با خلوص آزمایشگاهی (۹۹/۹۹۹٪) با دبی ۱ لیتر بر دقیقه توسط دستگاه گاززدایی چرخشی سیار انجام گردید. ترکیب شیمیایی فلاکس مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است. این فلاکس سطح مذاب آلومینیوم را پوشش داده و ضمن افزایش خلوص مذاب، مقداری اثر اصلاح‌سازی روی سیلیسیم

جدول (۳): ترکیب شیمیایی پوشش گرافیتی مورد استفاده در این پژوهش (درصد وزنی).

آب	سایر دیرگذاها	مواد معلق کننده	چسب و رزین	گرافیت	ترکیب
به مقدار لازم	۵	۵	۵	۸۵	درصد وزنی

جدول (۴): نوع پوشش استفاده شده بر روی قالب برای نمونه‌های ریختگی مختلف.

نمونه	نوع پوشش قالب
۱	بدون پوشش
۲	پوشش گرافیتی
۳	پوشش میکرو سرامیکی (ZR1)
۴	پوشش حاوی نانو ذرات سرامیکی (MM12)

جهت اطمینان از نتایج پژوهش، ریخته گری هر نمونه ۵ مرتبه تکرار گردید. نمونه‌های ریختگی پس از تمیزکاری تحت بازرسی رادیوگرافی قرار گرفته و تأثیر نوع پوشش در بروز عیوب حجمی داخلی شامل عیوب گازی و انقباضی بررسی شد. نوع ذرات پوشش‌های میکرونی و نانویی، توسط روش پراش پرتو ایکس^{۱۸} و ترکیب شیمیایی تقریبی پوشش MM12 توسط روش طیف سنج پلاسمای جفت شده القایی^{۱۹} و طیف سنجی تفکیک انرژی^{۲۰}، بدست آمد، که در جدول (۵) نشان داده شده است. جهت آنالیز فازی پوشش‌ها از دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Philips Xpert-MPD استفاده شد. لازم به ذکر است که پس از تعیین ترکیب شیمیایی پوشش MM12، پوشش میکرونی بر اساس سفارش نویسندگان، با ترکیبی شبیه به پوشش MM12 در شرکت رادانکو ساخته و به عنوان پوشش ZR1 نامگذاری شد. اندازه متوسط دانه فازها به کمک رابطه شرر (رابطه ۱) مشخص شد [۲۳-۲۵]:

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

در این رابطه λ طول موج بر حسب نانومتر (در اینجا ۰/۱۵۴۰۶

و تبدیل مورفولوژی تیغه ای به مورفولوژی فیبری و متمایل به کروی شکل می‌شود که بهبود خواص مکانیکی را بدنبال دارد [۲۱-۲۲]. علاوه بر این انتظار می‌رود عنصر بریلیم با کاهش اکسیداسیون مذاب، نقش غیر مستقیمی بر بهبود سیالیت مذاب در حین پر کردن قالب و عنصر استرانسیم با اصلاح مورفولوژی تیغه‌های سیلیسیوم نقش مفیدی در افزایش سیالیت مذاب و برد تغذیه در حین انجماد داشته باشد. مدل نمونه ریخته گری به شکل یک چهار شاخه دارای ضخامت‌های مختلف به اندازه ۲، ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر با پهنای ۳۰ میلی‌متر و طول ۲۵ سانتی‌متر طراحی و ساخته شد تا به شرایط واقعی یک قطعه ریختگی با ضخامت‌های مختلف نزدیک باشد. نقشه مکانیکی، نمای سه بعدی، یک نمونه ریخته گری شده با این مدل و نیز حوضچه بارریز مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است. جهت انجام ریخته گری با سرعت یکنواخت و ذوب ریزی دقیق با کمترین تلاطم و کمترین خطا، احتیاج به یک حوضچه بار ریزی مناسب بود که این حوضچه مطابق دستورالعمل جامعه ریخته گران آمریکا^{۱۶} به صورت دو حفره‌ای تهیه شد [۲۰].

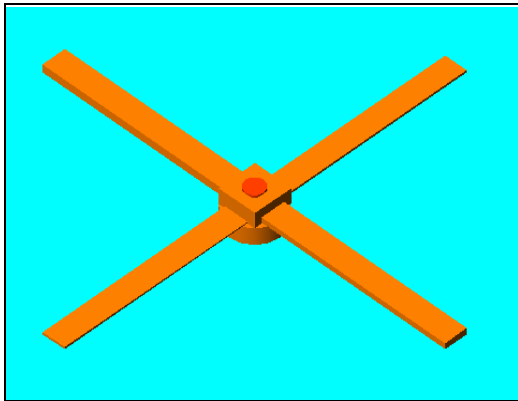
برای ساخت قالب از ماسه سیلیسی با ۵٪ وزنی چسب سیلیکات سدیم و دمش گاز دی اکسید کربن جهت سخت شدن قالب، استفاده شد. پس از آماده شدن قالب، سطح آن در دمای اتاق به کمک پیستوله توسط سه نوع پوشش شامل یک پوشش گرافیتی با نام تجاری M100 ساخت شرکت فسیکو، یک نوع پوشش میکرو سرامیکی با نام ZR1 ساخت شرکت رادانکو و یک نوع پوشش نانو سرامیکی با نام تجاری MM12 محصول شرکت نانویشن^{۱۷} کشور آلمان پوشش داده شده و توسط شعله گاز طبیعی خشک شد تا پوشش به خوبی بر روی سطح قالب بچسبد. ترکیب شیمیایی پوشش گرافیتی مورد استفاده در جدول (۳) نشان داده شده است.

برای بررسی تأثیر نوع پوشش قالب بر سلامت قطعات ریختگی، پس از آماده نمودن مذاب و انجام عملیات کیفی روی آن، مذاب در دمای ۶۲۵°C در قالب‌هایی با شرایط نشان داده شده در جدول (۴) ریخته گری شد.

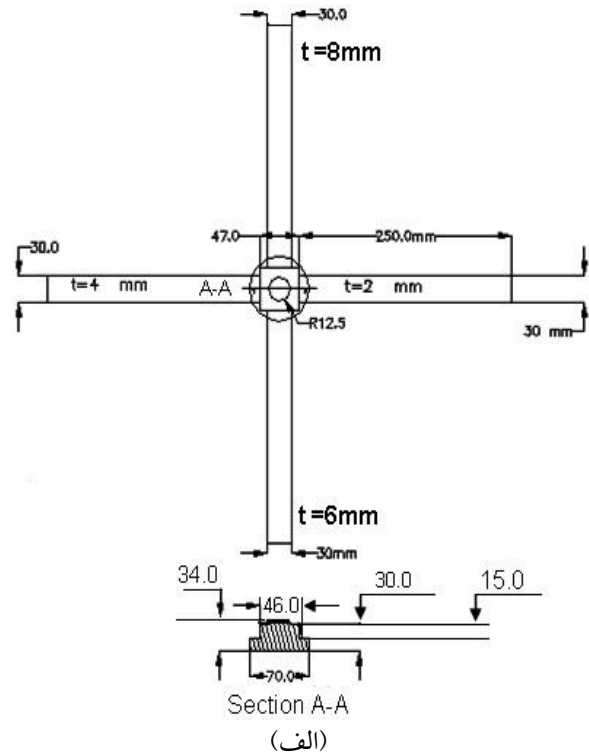
که β_M پهنای پرتو در وسط پیک ماکزیمم در الگوی پراش پرتو ایکس نمونه پودری نانویی MM12 و β_S پهنای پرتو در وسط پیک ماکزیمم در الگوی پراش پرتو ایکس نمونه پودری میکرونی ZR1 می‌باشد.

نانومتر)، θ زاویه ی پراش و β پهنای پرتو (بر حسب رادیان) در وسط پیک ماکزیمم است. مقدار β به کمک رابطه (۲) محاسبه شد [۲۴].

$$\beta^2 = \beta_M^2 - \beta_S^2 \quad (2)$$



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۲-الف): نقشه مکانیکی مدل طراحی شده برای آزمایش سیالیت، (ب) شکل سه بعدی مدل، (ج) یک نمونه ریخته گری شده با مدل ساخته شده و (د) مدل حوضچه بارریز دو حفره ای بر اساس دستورالعمل جامعه ریخته گران آمریکا [۲۰].

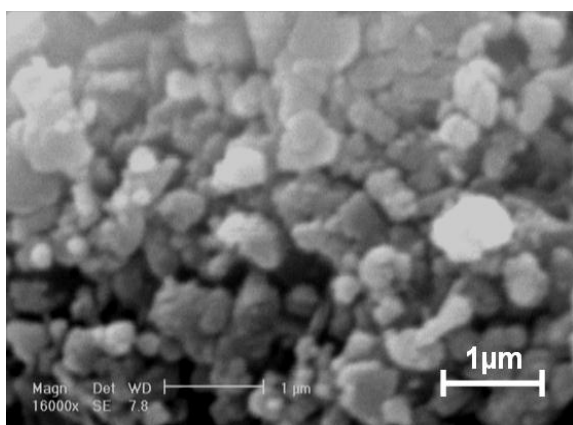
پوشش میکرونی ZR1 و پوشش نانویی MM12 در شکل (۳) - الف و ب) نشان داده شده است. ابعاد میکرومتری ذرات در پوشش ZR1 و کلوخه‌های متشکل از ذرات در محدوده نانومتری در پوشش MM12 در شکل (۳) - ب) دیده می‌شوند. استفاده از پوشش میکرونی با ترکیب شیمیایی مشابه پوشش نانویی به منظور ارزیابی تأثیر اندازه ذرات پوشش بر سلامت قطعات ریخته گری می‌باشد.

جدول (۵): ترکیب شیمیایی پوشش MM12 و ZR1 مورد استفاده در این پژوهش (درصد وزنی).

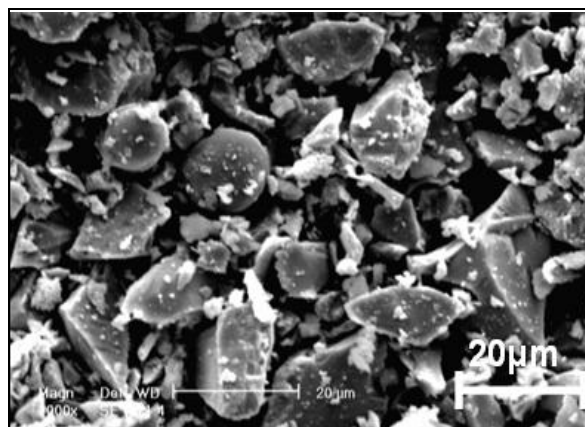
ترکیب	آب	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	SiO ₂	بقیه
درصد	۶۰	۳۰	۷	۱	۲
وزنی					

۳- نتایج و بحث

تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از



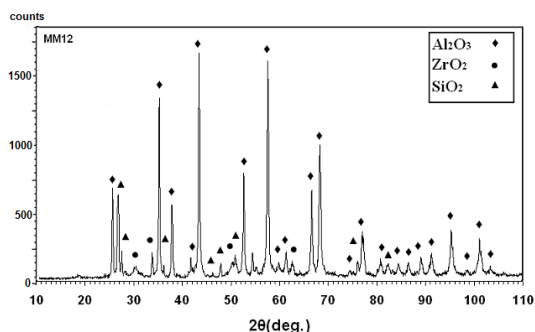
(ب)



(الف)

شکل (۳): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از: الف) پوشش ZR1 و ب) پوشش MM12.

شکل ۲۰۱۵ °C است. با فرض آنکه نانو ذرات Al₂O₃ به صورت تک کریستالی هم باشند، نقطه ذوب آن‌ها شبیه حالت توده‌ای شکل آن‌ها می‌باشد، زیرا تأثیر اندازه ذرات بر روی نقطه ذوب زمانی مهم می‌شود که اندازه ذرات کمتر از ۱۰ نانومتر باشد، بنابراین انتظار نمی‌رود در حین ریخته گری قطعات، تف جوشی ذرات پوشش اتفاق افتد [۲۶].



شکل (۴): الگوی پراش پرتو ایکس پوشش نانو سرامیکی MM12.

الگوی پراش پرتو ایکس پوشش نانو سرامیکی (MM12) و میکرو سرامیکی (ZR1) استفاده شده در این پژوهش در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. با توجه به الگوی نشان داده شده در شکل (۴) مشاهده می‌شود، پوشش نانو سرامیکی MM12 حاوی ذرات سرامیکی Al₂O₃، ZrO₂ و SiO₂ می‌باشد. به کمک رابطه شرر اندازه متوسط دانه فازها مشخص شد. با توجه به الگوی پراش پرتو ایکس و به کمک نرم افزار APDW مقادیر β و θ قابل محاسبه و برابر زیر می‌باشند:

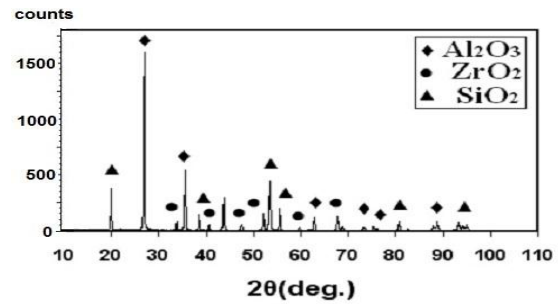
$$\theta_{Al_2O_3} = 28.78^\circ, \beta_{Al_2O_3} = 0.0053$$

$$\beta_{ZrO_2} = 0.0012, \theta_{ZrO_2} = 16.91^\circ$$

$$\beta_{SiO_2} = 0.0058, \theta_{SiO_2} = 13.38^\circ$$

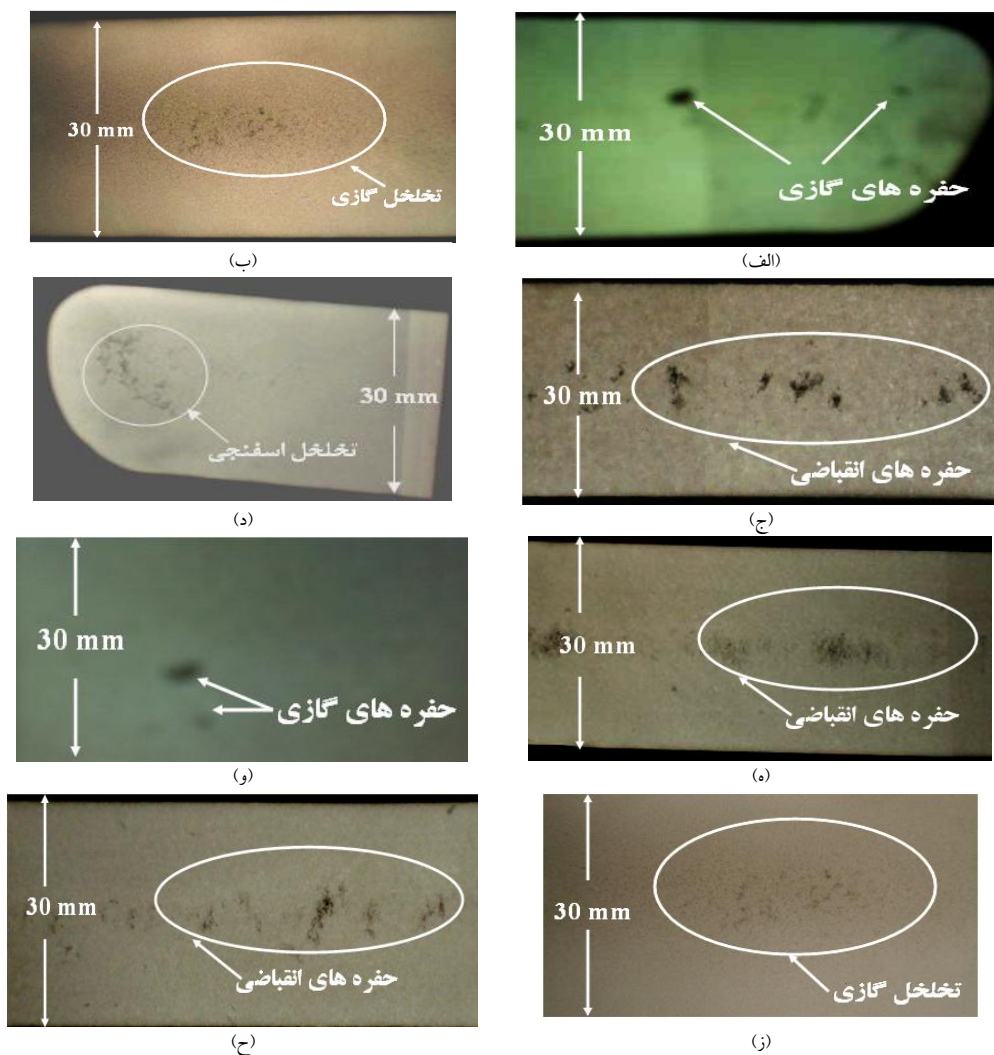
با توجه به رابطه شرر مشخص شد فازهای Al₂O₃، ZrO₂ و SiO₂ در پوشش MM12 به ترتیب دارای اندازه متوسط دانه حدود ۳۰، ۱۲۰ و ۲۵ نانومتر هستند. نقطه ذوب Al₂O₃ توده‌ای

مناطق مختلف نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب ماسه‌ای بدون پوشش، قالب ماسه‌ای دارای پوشش گرافیتی و قالب ماسه‌ای دارای پوشش سرامیکی میکرونی در شکل (۶) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تمامی تصاویر نشان داده شده در شکل (۶)، به جز شکل (۶-د)، مربوط به مقاطع ۸ میلی-متری قطعات هستند و تصویر رادیوگرافی شکل (۶-د) یک نمونه ریخته‌گری شده با ضخامت ۲ میلی‌متر در قالب ماسه‌ای بدون پوشش را نشان می‌دهد.



شکل (۵): الگوی پراش پرتو ایکس پوشش میکرو سرامیکی ZrO₂

برخی از تصاویر گرفته شده توسط رادیوگرافی پرتو ایکس از



شکل (۶): تصاویر رادیوگرافی از نمونه ریخته شده در الف) تا د) قالب ماسه‌ای بدون پوشش، ه) تا ز) قالب ماسه‌ای با پوشش گرافیتی و ح) قالب ماسه‌ای با پوشش میکرو سرامیکی (ZrO₂).

قالب‌های با پوشش گرافیتی یا میکروسرامیکی در مقاطع نازک‌تر از ۸ میلی‌متر عیوب به وجود آمده کمتر بودند. شکل (۷) تصویر رادیوگرافی دو نمونه ریخته‌گری شده با ضخامت ۸ میلی‌متر در قالب ماسه‌ای با پوشش نانو سرامیکی MM12 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است هیچ‌گونه عیوب داخلی در این تصاویر دیده نمی‌شود.



(ب)

تحقیقات مختلف نشان داده است که افزایش سرعت سرد شدن قطعه باعث کاهش عیوب انقباضی یا توزیع آن‌ها به صورت یکنواخت‌تر و ریزتر می‌گردد. تصویر رادیوگرافی شکل (۶-د) یک نمونه ریخته‌گری شده با ضخامت ۲ میلی‌متر در قالب ماسه‌ای بدون پوشش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای قالب بدون پوشش حتی در این مقطع نازک هم عیب تخلخل اسفنجی به وجود آمده است. این در حالی است که در مورد



(الف)

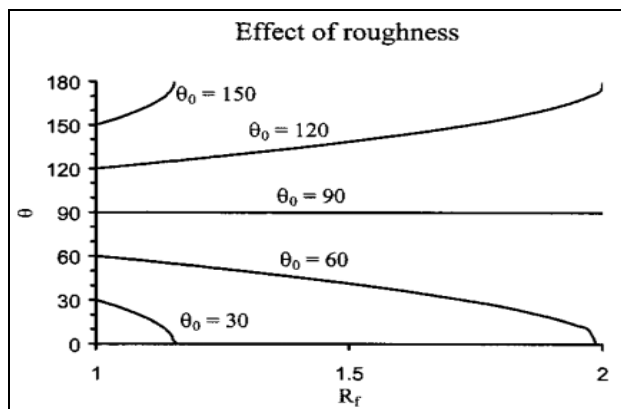
شکل (۷): تصویر رادیوگرافی نمونه‌های با ضخامت مقطع ۸ میلی‌متر ریخته‌شده در قالب ماسه‌ای با پوشش نانو سرامیکی MM12: (الف) نمونه تهیه شده از ابتدای تیغه و (ب) نمونه تهیه شده از انتهای تیغه.

قالب بر سیالیت مذاب تاثیر گذاشته و از بروز عیوب نیامد و سردجوشی جلوگیری می‌کند. ولی از آنجایی که عیوب انقباضی اصولاً پس از پر شدن قالب و با پیشرفت انجماد بوجود می‌آیند، به نظر نمی‌رسد که صافی و زبری سطح به طور مستقیم بتواند بر تغذیه رسانی مذاب در حین انجماد تاثیر بگذارد. عیوب انقباضی عمدتاً در اثر عدم مذاب رسانی کافی در اواخر انجماد رخ می‌دهد [۶]. فازهای اکسیدی که در تماس مستقیم آلومینیوم مذاب و رطوبت قالب بوجود می‌آیند، با بستن مسیر حرکت مذاب در شبکه دندریتی در اواخر انجماد، تغذیه رسانی را مشکل می‌سازند. پوشش‌های به کار رفته به علت پایداری حرارتی و شیمیایی بالا می‌توانند واکنش‌های شیمیایی بین مذاب و مواد قالب گیری را کاهش دهند [۶].

علاوه بر این، به نظر می‌رسد که پوشش‌های استفاده شده با افزایش سرعت سرد شدن مذاب باعث کاهش عیوب انقباضی شده باشند. حتی پوشش‌های سرامیکی میکرونی و نانومتری را می‌توان به تاثیر آن‌ها بر ایجاد پوسته‌های اکسیدی در مذاب و سرعت سرد شدن مذاب نیز ارتباط داد. مطمئناً صافی و کیفیت سطحی

به نظر می‌رسد علت کاهش عیوب گازی با استفاده از پوشش‌های گرافیتی و پوشش‌های سرامیکی میکرونی و نانومتری به دلیل پایداری حرارتی و شیمیایی بالای مواد موجود در این پوشش‌ها می‌باشد. این پوشش‌ها با مذاب واکنش نداده و علاوه بر آن ارتباط بین مواد قالب گیری و آلومینیوم مذاب را قطع می‌کنند. در نتیجه، از یک طرف امکان واکنش مذاب با مواد قالب گیری و چسب از بین می‌رود و از طرف دیگر امکان واکنش بین مذاب و رطوبت جزئی موجود در مواد قالب گیری و چسب برطرف می‌شود. این واکنش باعث اکسیداسیون آلومینیوم و آزاد شدن گاز هیدروژن در سطح تماس قالب و مذاب و ایجاد عیوب گازی می‌شود. پوشش‌های سرامیکی میکرونی و نانومتری در دمای بالای ریخته‌گری، محصولات گازی نیز تولید نمی‌کنند و از این لحاظ بر پوشش گرافیتی برتری دارند. کاهش عیوب انقباضی با استفاده از پوشش‌های گرافیتی و پوشش‌های سرامیکی میکرونی و نانومتری را می‌توان به تاثیر آن‌ها بر ایجاد پوسته‌های اکسیدی در مذاب و سرعت سرد شدن مذاب نیز ارتباط داد. مطمئناً صافی و کیفیت سطحی

سطح تماس بیشتری با مذاب و قطعه در حال انجماد باشند که این مسئله نیز به افزایش سرعت سرد شدن مذاب کمک می‌کند.



شکل (۸): تأثیر زبری سطح بر زاویه خیس شونده یک سطح جامد و مایع [۲۹].

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر نوع پوشش قالب ماسه‌ای بر عیوب حجمی قطعات ریخته‌گری دیواره نازک آلومینیومی به روش رادیوگرافی پرتو ایکس بررسی گردید. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که:

- بیشترین مقدار عیوب گازی شامل حفره‌ها و تخلخل‌های گازی، و عیوب انقباضی شامل حفره‌های انقباضی و تخلخل‌های اسفنجی در قطعات ریخته شده در قالب‌های بدون پوشش و کمترین مقدار این معایب در قالب‌های پوشش داده شده با ذرات سرامیکی نانومتری وجود دارد به طوری که این قطعات تا حد زیادی فاقد عیوب با منشأ گازی و انقباضی بودند.
- به نظر می‌رسد کاهش این عیوب در پوشش گرافیتی و پوشش‌های حاوی ذرات سرامیکی میکرونی یا نانومتری به دلیل پایداری حرارتی و شیمیایی بالا و سرعت انتقال حرارت بالاتر این مواد نسبت به مواد قالب‌گیری بدون پوشش است.
- در مورد پوشش حاوی ذرات سرامیکی نانومتری، به نظر می‌رسد که لایه گازی محدودتر بین پوشش و سطح مذاب و قطعه و خیس شونده با لاتر مذاب و پوشش، به سرعت بالاتر انتقال حرارت و سلامت بیشتر قطعات کمک کند.

گردند. در مورد پوشش حاوی نانو ذرات سرامیکی، دو مسئله دیگر باید مورد توجه قرار گیرد. اولاً، انتقال حرارت از مذاب توسط لایه گازی ایجاد شده بین مذاب و فرورفتگی‌های زبری سطح قالب کنترل می‌شود [۲۷] و هر عاملی که باعث کاهش ضخامت این لایه شود سرعت انتقال حرارت را زیاد می‌کند. مثلاً ایلخچی و همکارانش [۲۸] نشان دادند که با اعمال فشار بر مذاب در حین انجماد این فاصله کاهش یافته و انتقال حرارت بیشتر می‌شود. جدول (۶) زبری سطح قالب برای پوشش‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود زبری سطح و عمق پستی و بلندی‌های سطحی در قالب‌های پوشش داده شده با نانوذرات سرامیکی کمتر از سایر نمونه‌ها است. از این رو انتظار می‌رود سطح تماس این پوشش‌ها با مذاب بیشتر بوده و قدرت تیریدی قالب تأثیر بیشتری در انجماد سریع و سلامت قطعه داشته باشد.

جدول (۶): زبری سطح قالب برای پوشش‌های مختلف

نوع قالب	زبری سطح (میکرومتر)
قالب ماسه‌ای بدون پوشش	۷.۳
قالب ماسه‌ای با پوشش گرافیتی	۶.۸
قالب ماسه‌ای با پوشش میکرونی ZR1	۴.۷
قالب ماسه‌ای با پوشش نانویی MM12	۴.۵

مسئله دیگری که بر سطح تماس مذاب و قالب تأثیر می‌گذارد، زاویه خیس شونده بین این دو است. اصولاً مذاب فلزات زاویه خیس شونده بالایی با اکسیدها دارند ($>90^\circ$). تحقیقات مختلف نشان داده است که زاویه خیس شونده بین سطوح جامد و مایعات از زبری سطح تأثیر می‌پذیرد و برای سطوحی که زاویه خیس شونده آنها در حالت کاملاً مسطح بیشتر از 90° است، با افزایش زبری سطح زاویه خیس شونده افزایش می‌یابد [۲۹]. این مسئله در شکل (۸) نشان داده شده است. در این شکل R_f معیاری از زبری سطح و θ زاویه خیس شونده است. بر این اساس می‌توان در نظر گرفت که سطوح پوشش داده شده با ذرات نانومتری دارای زاویه خیس شونده کمتر و در نتیجه

Microstructure and Mechanical Properties of Al₂O₃/Ni Nanocomposites by a Chemical Method", Materials Research Bulletin, Vol. 38, pp. 1591-1600, 2003.

- [16] L. Feng, Y. Gencang, "Solidification of Superalloy in a SiO₂-ZrO₂-B₂O₃ Coating Mould", Journal of Non-Crystalline, Vol. 290, pp. 105-114, 2001.
- [17] ASM Handbook Committee, Metals Handbook: Aluminium and Aluminium Alloys", ASM International, 1992.
- [18] J.E. Gruzleski, B.M. Closset, The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys, American Foundrymen's Society, 1990.
- [19] N. Hongjun, B. Sun, H. Jiang, W. Ding, "Effects of Rotating Impeller Degassing on Microstructure and Mechanical Properties of A356 Scraps ", Materials Science and Engineering A, Vol. 352, pp. 294-299, 2003.
- [20] Metalcaster's Reference and Guide, 1st. ed., American Foundrymen's Society, 1972.
- [21] D. Stuart, M. Donald, N. Kazuhiro, K. Arne, Dahle., "Eutectic Grain Size and Strontium Concentration in Hypoeutectic Aluminium-Silicon Alloys", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 442, pp. 184-191, 2006.
- [22] A.K. Prasada Rao, K. Das, B.S. Murty, M. Chakraborty, "Microstructural Features of As-Cast A-356 Alloy Inoculated with Sr, Sb Modifiers and Al-Ti-C Grain Refiner Simultaneously" Materials Letters, Vol. 62, pp. 273-275, 2008.
- [23] D. Delpontas, P. Svarnas, I. Alexandrou, A. Siokou, K. Black and J.W Bradley, "γ- Al₂O₃ Nanoparticle Production by Arc-Discharge in Water: in Situ Discharge Characterization and Nanoparticle Investigation", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 42-245204, pp- 1-11, 2009.
- [24] B.D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction, 2nd ed., Addison-Wesley, 1978.
- [25] N. P. Prasad, Nanophotonics, John Willey & Sons Inc., 2004.
- [26] J.Y. Huang, "In Situ Observation of Quasimelting of Diamond and Reversible Graphite-Diamond Phase Transformations", Nano Letters, Vol. 7, pp 2335-2340, 2007.
- [27] Hamasaiid, M.S. Dargusch, C.J. Davidson, S. Tovar, T. Loulou, F. Rezaï-Aria and G. Dour, "Effect of Mold Coating Materials and Thickness on Heat Transfer in Permanent Mold Casting of Aluminum Alloys", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 38, pp. 1303-1316, 2007.
- [28] A.F. Ilkhchy, N. Varahraam, and P. Davami, "Evaluation of Pressure Effect on Heat Transfer Coefficient at the Metal- Mold Interface for Casting of A356 Al Alloy", Iranian Journal of Materials Science & Engineering, Vol. 9, pp. 11-20, 2012.
- [29] M. Nosonovsky. and B. Bhushan, "Roughness Optimization for Biomimetic Superhydrophobic Surfaces," Microsystem Technologies, Vol. 11, pp. 535-549, 2005.

۵- قدردانی

نویسندگان از همکاری کارگاه ریخته گری شرکت صنایع هواپیماسازی ایران (هسا) به خاطر استفاده از امکانات کارگاه‌های ریخته گری و مدل سازی و نیز آزمایشگاه مرکزی این شرکت به خاطر همکاری در آزمایشات شیمی تر و رادیوگرافی تشکر و قدردانی می‌کنند.

۶- مراجع

- [1] S. Vadim, A. Z. Nikolai, Casting Aluminum Alloy, 1st. ed., Moscow Institute of Steel and Alloys-State Technical University, Elsevier Linacre House, Oxford, 2007.
- [2] GOST 1583-89, "Aluminium casting alloys", Moscow, 1993.
- [3] R W. Osorio, R.L. Garcia, R .P. Goulart, A. Garcia, "Effect of Eutectic Modification and T4 Heat Treatment on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of an Al-9wt%Si Casting Alloy " Materials Chemistry and Physics, Vol. 106, pp. 343-349, 2007.
- [4] ASM Handbook Committee, Metals Handbook, Vol. 15, Casting, 10th ed., ASM International, 2008.
- [5] Military standard, Mil-std-2175a, "Castings, Classification and inspection", Department of defense, USA, 1993.
- [6] J. Campbell, Castings, 2nd ed., Elsevier Butterworth Heinemann publication, 2003.
- [7] A.K. Dahel, L. Baeckrund and L. Arnberg, "Castability of Aluminium Foundry Alloys", Final Report for AFS, 1997.
- [8] M. C. Flemings, F. R. Mollard and H. F. Taylor, "Mold Variables Influence on Fluidity of Aluminum", AFS Transactions, Vol. 69, pp. 566-576, 1961.
- [9] M.D. Sabatino, "Fluidity of Aluminum Foundry Alloys", Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2005.
- [10] M.D. Sabatino, L. Arnberg, "A Review on the Fluidity of Al Based Alloys", Metallurgical Science and Technology, Vol. 22, pp. 9-15, 2004.
- [11] K.R. Ravi, R.M. Pillai, K.R. Amaranathan, B.C. Pai, M. Chakraborty, "Fluidity of Aluminum Alloys and Composites: A Review", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 456, pp. 201-210, 2008.
- [12] J. Campbell and R.A. Hardning, "The Fluidity of Molten Metals", Training in Aluminium Application Technologies, TALAT Lecture 3205, Birmingham, 1994.
- [13] P.R. Beely, Foundry Technology, Butterworth Scientific, 1972.
- [14] N.A. Goldstein, Handbook of Nanophase Materials, Marcel Dekker Inc., 1997.
- [15] G.J. Li, X.X. Huang and J.K. Guo, "Fabrication,

- 12 -Rotary degassing
- 13 -NaCl
- 14 -KCl
- 15 -LaF₃
- 16 -American Foundrymen Society (AFS)
- 17 - Nanovation
- 18 - X-Ray Diffraction (XRD)
- 19 - ICP- Inductively Coupled Plasma
- 20 - Energy Dispersive Spectrometry (EDS)

۷- پی نوشت

- 1 - Thin wall casting
- 2 - Gas hole
- 3 - Gas porosity
- 4- Shrinkage cavity
- 5 - Sponge porosity
- 6 - Long-freezing-range
- 7 - Mould filling
- 8 - Feeding
- 9 - Porosity
- 10 - Macro segregation
- 11 - Hot tearing