



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

بررسی اثرات دمای ذوب بر رفتار انجمادی کامپوزیت درجا Al-Mg₂Si به روش آنالیز حرارتی

سحر اشکواری^۱، سعید شبستری^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی- دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

* نویسنده مکاتبه کننده: E-mail: shabestari@iust.ac.ir

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۱

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۶

امروزه کامپوزیت‌های درجا Al-Mg₂Si به دلیل چگالی کم، استحکام ویژه زیاد، مقاومت به سایش و پایداری حرارتی خوب، مورد توجه صناعی از جمله خودروسازی و هوافضا قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، به بررسی اثر مقدار دمای ذوب بر مشخصه‌های انجمادی کامپوزیت درجا Al-20%Mg₂Si، از طریق آنالیز حرارتی منحنی‌های سرد شدن پرداخته شده است. به این منظور، منحنی‌های آنالیز حرارتی این کامپوزیت در سه دمای ذوب ۷۵۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد رسم شده و تأثیر دمای ذوب بر مشخصه‌های انجمادی این کامپوزیت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات دمای ذوب بر مشخصه‌های جوانه‌زنی و رشد فاز مقاوم‌ساز Mg₂Si و مشخصه‌های واکنش یوتکتیک تأثیرگذار است. به گونه‌ای که افزایش دمای ذوب از ۷۵۰°C به ۸۵۰°C موجب افزایش دمای جوانه‌زنی فاز مقاوم‌ساز Mg₂Si، از ۶۸۷/۶°C به ۶۹۰/۲°C، افزایش دامنه انجماد به میزان ۲۲/۴°C و کاهش دمای رشد واکنش یوتکتیک دوتایی به میزان ۳/۷°C می‌شود. با افزایش دمای ذوب، اندازه فاز مقاوم‌ساز Mg₂Si، ۱۶ درصد کاهش یافته و توزیع آن‌ها در ساختار کامپوزیت یکنواخت‌تر می‌شود که این امر می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی شود.

واژه‌های کلیدی:

آنالیز حرارتی، کامپوزیت درجا Al-Mg₂Si، فوق ذوب، مشخصه‌های انجمادی.

ارجاع به این مقاله:

سحر اشکواری، سعید شبستری، بررسی اثرات دمای ذوب بر رفتار انجمادی کامپوزیت درجا Al-Mg₂Si به روش آنالیز حرارتی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار ۱۳۹۹، جلد ۴، شماره ۱، صفحات ۹-۱.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2019.208458.1107

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر طراحی مواد بر مواد سبک وزن، کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست متمرکز شده است. به موازات این روند، کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات با توجه به خواص مطلوبی از قبیل چگالی کم، قابلیت ریخته‌گری عالی، مقاومت به سایش خوب، خواص مکانیکی عالی و هزینه تولید پایین، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱].

فرایند درجا از روش‌های متداول تولید کامپوزیت‌های ریختگی با زمینه آلومینیم است که از نظر ترمودینامیکی پایدار بوده و اساساً به‌وسیله جوانه‌زنی و رشد فاز تقویت‌کننده به‌صورت درجا از زمینه مادر به وجود می‌آید. کامپوزیت‌های تولیدشده به روش درجا به دلیل ایجاد فصل مشترک‌های پایدار بین ذرات و زمینه، توزیع یکنواخت و ترشوندگی خوب ذرات تقویت‌کننده، سیستم پایدار

ترمودینامیکی و همچنین ساده بودن روش ساخت آنها، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲-۴]. کامپوزیت‌های درجا Al-Mg₂Si، به‌عنوان دسته‌ای از مواد فوق سبک مطرح شده‌اند که دارای پتانسیل بالایی به‌عنوان ماده مقاوم به سایش هستند. زیرا ترکیب بین فلزی Mg₂Si دارای نقطه ذوب بالا، چگالی پایین، سختی بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین، فصل مشترک تعادلی و کارپذیری عالی است. این مواد با توجه به حضور میزان زیادی منیزیم در آنها، دارای چگالی کمتری نسبت به آلیاژهای رایج Al-Si بوده و با توجه به پایداری حرارتی‌شان در دمای متوسط و بالا، به‌عنوان جایگزینی برای آلیاژهای هایپرئوتکتیک Al-Si در ساخت قطعات موتور به‌ویژه پیستون، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵-۷]. تولید کامپوزیت‌های Al-Mg₂Si به روش ریخته‌گری به دلیل محدوده دمایی وسیع

پوشش داده شده با گرافیت همزده شد. همچنین به منظور محافظت از مذاب در برابر اکسیداسیون، سطح مذاب توسط فلاکس پوششی Magrex پوشانده شد. این پودر، روی سطح مذاب آلومینیم، ذوب شده و مانع از تماس مذاب با اتمسفر هوا می شود. مذاب به مدت ۱۰ دقیقه جهت همگن سازی در دمای ۷۵۰°C نگه داشته شد. در پایان، پس از سرپاره گیری و حذف اکسیدهای سطحی، مذاب در دمای ۷۵۰±۱۰°C، به آرامی از ارتفاع کمتر از یک سانتی متر درون قالب فولادی که از قبل پیش گرم شده، ریخته شد تا از ایجاد تلاطم و تشکیل فیلم های اکسیدی در حین ریختن جلوگیری شود.

برای تعیین دقیق ترکیب شیمیایی کامپوزیت آماده شده، آزمایش پلاسما جفت شده القایی (ICP) روی کامپوزیت انجام شد. ترکیب شیمیایی کامپوزیت در جدول (۲) ارائه شده است.

۲-۲- آنالیز حرارتی

برای آزمایش آنالیز حرارتی، در هر آزمایش حدود ۲۰۰ گرم از شمش تولید شده بریده شد و مجدد ذوب شد. مذاب به طور جداگانه تحت سه دمای ذوب ۷۵۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته و به مدت ۲۵ دقیقه در هر دما نگه داشته شد. برای محافظت از مذاب در برابر اکسیداسیون از پودر فلاکس Magrex استفاده شد. سپس مذاب آماده شده پس از سرپاره گیری، در دمای ۷۵۰±۱۰ درجه سانتی گراد به آرامی درون قالب فولادی جدار نازک که ترموکوپل در مرکز قالب و در فاصله ۲/۵ سانتی متر از کف آن ها ثابت شده بود، ریخته شد. از ترموکوپل های نوع K (کروم-آلومل) استفاده شده است. پس از ریختن مذاب درون قالب، تغییرات دمایی نمونه در حین سرد شدن، از طریق ترموکوپل به سیستم جمع آوری اطلاعات دستگاه آنالیز حرارتی و پس از آن به کامپیوتر منتقل شده و ذخیره شد. در نهایت منحنی های دما-زمان و همچنین منحنی های دیفرانسیل آن ها در حین انجماد ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفت.

۲-۳- بررسی های ریزساختاری

برای مطالعه ریزساختار، نمونه های آنالیز حرارتی در مقطع نوک ترموکوپل ها برش عرضی خورده و تحت عملیات سنباده زنی و پولیش قرار گرفتند. از محلول حاکاکی HF (۰/۵ درصد) استفاده شد. پس از مراحل آماده سازی، با استفاده از میکروسکوپ نوری و نرم افزار Image J، بررسی های ریزساختاری و متالوگرافی کمی روی نمونه ها انجام شد.

انجماد، موجب ایجاد فاز اولیه Mg₂Si درشت و خشن می گردد که منجر به افت خواص مکانیکی می شود. اما این روش به دلیل سادگی و ارزان بودن بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. از سوی دیگر و با توجه به اینکه خواص قطعات متأثر از ریزساختار آن- هاست و ریزساختار یک قطعه نتیجه مستقیم ترکیب شیمیایی و شرایط انجمادی آن است، مطالعه شرایط انجمادی آلیاژها به منظور کنترل پارامترهای انجمادی و دستیابی به خواص مطلوب اهمیت ویژه ای خواهد یافت. یکی از روش های رسیدن به این هدف، استفاده از روش آنالیز حرارتی منحنی های سرد شدن است. در این روش، یک ترموکوپل داخل قالبی که نمونه در آن ریخته شده و در حال انجماد است، قرار می گیرد و تغییرات درجه حرارت در حین انجماد نمونه از طریق مبدل به کامپیوتر ارسال می شود. در نهایت با رسم منحنی دما - زمان انجماد نمونه و تحلیل آن با کمک کامپیوتر و با استفاده از روش های ریاضی می توان به نتایج کمی و کیفی مطلوب با ضریب اطمینان بالا دست یافت [۸-۱۲].

با توجه به اینکه تاکنون تحقیقات چندانی بر شرایط جوانه زنی و رشد فازهای مقاوم ساز در تولید کامپوزیت ها از طریق آنالیز حرارتی صورت نگرفته است و با توجه به نیاز کامپوزیت های درجا Al-Mg₂Si تولید شده به روش ریخته گری، به بهسازی و کنترل ریزساختار از طریق کنترل فرایند انجماد و همچنین رشد روزافزون کاربرد این کامپوزیت ها در صنایع خودروسازی و هوافضا، در این تحقیق به بررسی شرایط انجمادی کامپوزیت درجا Al-Mg₂Si پرداخته شده است. در این راستا تأثیر اعمال فوق ذوب بر مشخصه های انجمادی کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته که می تواند به بهبود کیفیت و خواص قطعات تولیدی از این کامپوزیت ها کمک نماید.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- تولید کامپوزیت

به منظور کامپوزیت سازی، ابتدا مقدار مناسب از آلیاژ آلومینیم ۴۱۳ در بوته گرافیتی و با استفاده از کوره مقاومتی ذوب شد. سپس مقدار مورد نیاز منیزیم (مقدار ۱۰٪ اتلاف برای منیزیم در نظر گرفته شد) به صورت قطعات کوچک و پیچیده شده در فویل آلومینیمی و پیش گرم شده تا دمای ۳۰۰°C، در محدوده دمایی ۷۵۰-۷۲۰ درجه سانتی گراد و با کمک یک پلانجر به درون مذاب اضافه شد. تا کاملاً حل شود. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۴۱۳ استفاده شده در این تحقیق در جدول (۱) ارائه شده است. پس از افزودن منیزیم، به منظور اطمینان از حصول یکنواختی و اختلاط کامل منیزیم، مذاب با استفاده از یک همزن فولادی

جدول ۱- ترکیب شیمیایی شمش آلومینیم ۴۱۳ استفاده شده در این تحقیق (درصد وزنی)

Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Mg	Si	آلیاژ
باقیمانده	۰/۰۲	-	۰/۴۲	۰/۸	۰/۰۲	۱۱/۴۷	۴۱۳

جدول ۲- ترکیب شیمیایی کامپوزیت تولید شده (درصد وزنی)

Al	Fe	Cu	Si	Mg	آلیاژ
باقیمانده	۰/۳۲	۰/۱۲	۷/۵۸	۱۳/۹۳	Al-20% Mg ₂ Si

۳- نتایج و بحث

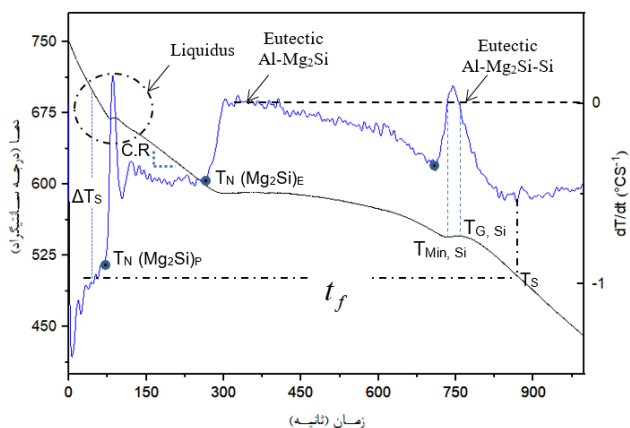
۳-۱- بررسی منحنی‌های سرد شدن و استخراج پارامترهای انجمادی

شکل (۱)، منحنی سرد شدن و مشتق اول آن را برای کامپوزیت Al-20%Mg₂Si در سرعت سرد شدن ۰/۴ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه نشان می‌دهد. در این شکل، سه توقف دمایی در منحنی سرد شدن مشاهده می‌شود. با توجه به دیاگرام فازی شبه دوتایی Al-Mg₂Si و آنچه در منابع مختلف گزارش شده است، ساختار کامپوزیت Al-Mg₂Si شامل فاز Mg₂Si اولیه و ساختار یوتکتیک دوتایی Al-Mg₂Si است [۱۳]. همچنین گزارش شده است که با وجود سیلیسیم اضافه در کامپوزیت، واکنش یوتکتیک سه‌تایی Al-Mg₂Si-Si نیز رخ می‌دهد [۱۴-۱۶]. در تحقیق حاضر به دلیل حضور مقداری سیلیسیم اضافه در ترکیب کامپوزیت Al-20%Mg₂Si، پیک‌های موجود در منحنی سرد شدن به ترتیب مربوط به تشکیل فاز مقاوم‌ساز Mg₂Si اولیه، واکنش یوتکتیک دوتایی α-Al + Mg₂Si و واکنش یوتکتیک سه‌تایی α-Al + Mg₂Si + Si است. در این شکل پارامترهای انجمادی مورد بررسی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، این پارامترهای انجمادی شامل دمای جوانه‌زنی فاز مقاوم‌ساز Mg₂Si اولیه، تحت تبرید گرمابخشی منطقه منحنی مایع، مشخصه‌های واکنش‌های یوتکتیک دوتایی و یوتکتیک سه‌تایی و دمای پایان انجماد است.

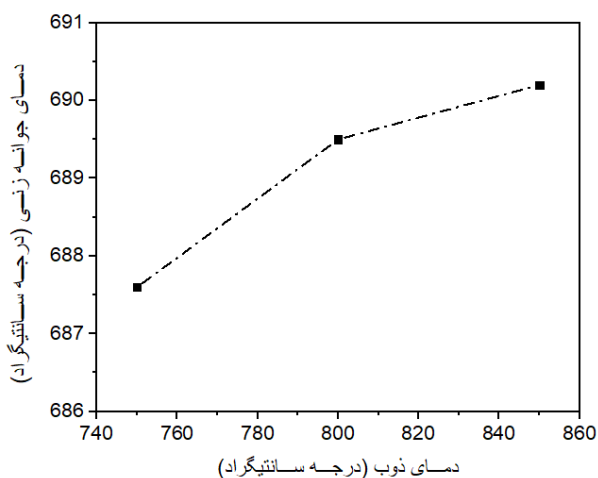
۳-۲- تأثیر دمای ذوب بر دمای جوانه‌زنی فاز Mg₂Si اولیه

شکل (۲)، تغییرات دمای جوانه‌زنی ذرات Mg₂Si اولیه در اثر اعمال دماهای ذوب (مقدار فوق ذوب‌های) مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با افزایش دمای ذوب از ۷۵۰ به ۸۵۰ °C، دمای جوانه‌زنی فاز Mg₂Si اولیه از ۶۸۷/۶ °C به ۶۹۰/۲ °C افزایش می‌یابد. تاکنون دلیل واضح و مشخصی برای افزایش دمای جوانه‌زنی در اثر افزایش دمای ذوب گزارش نشده است. اما دلیل این افزایش دما را می‌توان به این صورت عنوان نمود که افزایش دمای ذوب موجب افزایش سرعت فرایند نفوذ و سهولت در جوانه‌زنی و در نتیجه افزایش دمای جوانه‌زنی می‌شود.

از سوی دیگر با افزایش دمای ذوب، تعداد خوشه‌های اتمی موجود در مذاب و اندازه متوسط گروه‌های اتمی کاهش می‌یابد و این امر موجب کاهش تعداد مکان‌های مناسب برای جوانه‌زنی غیرهمگن و افزایش تحت تبرید جوانه‌زنی می‌شود. به این معنی که خوشه‌های اتمی که شعاع کمتری نسبت به شعاع بحرانی هسته‌ها دارند، نیز می‌توانند به مکان‌های جوانه‌زنی پایدار با افزایش تحت تبرید تبدیل شوند و جوانه‌زنی با سهولت بیشتری صورت می‌گیرد. در نتیجه دمای جوانه‌زنی یا دمای منحنی ذوب افزایش می‌یابد [۱۷، ۱۸].



شکل ۱- منحنی سرد شدن کامپوزیت Al-20%Mg₂Si و مشتق اول آن



شکل ۲- تأثیر دماهای مختلف ذوب بر دمای جوانه‌زنی فاز Mg₂Si اولیه

۳-۳- تأثیر دمای ذوب بر تحت تبرید گرمابخشی منطقه

منحنی مایع

در جدول (۳)، تأثیر دمای ذوب بر میزان تحت تبرید گرمابخشی ذرات Mg₂Si اولیه آورده شده است. تحت تبرید گرمابخشی به صورت اختلاف دمای رشد و دمای کمینه ($T_{G, Mg_2Si} - T_{Min, Mg_2Si}$) اندازه گیری شده است. با توجه به این جدول مشاهده می شود که تحت تبرید گرمابخشی با افزایش دمای ذوب کاهش می یابد. دلیل این امر را می توان به سریع تر فعال شدن هسته های موجود در مذاب به خاطر سرعت نفوذ بالاتر در دماهای ذوب بالاتر و تسهیل شرایط رشد مرتبط دانست. بنابراین سیستم با میزان گرمابخشی کمتری به دمای رشد می رسد.

مطابق با تحقیقات پیشین، کاهش در تحت تبرید گرمابخشی موجب بهبود ریزساختار می شود. به این خاطر که با افزایش گرمابخشی، پتانسیل جوانه زایی مذاب کاهش می یابد. همچنین، گرمابخشی ریز کردن اندازه دانه را از طریق اجازه دادن به رشد دانه های موجود و جلوگیری از جوانه زنی بیشتر، محدود می کند [۱۹، ۱۰، ۲۱]. بنابراین انتظار می رود که با افزایش دمای ذوب، اندازه ذرات Mg₂Si اولیه کاهش یابد.

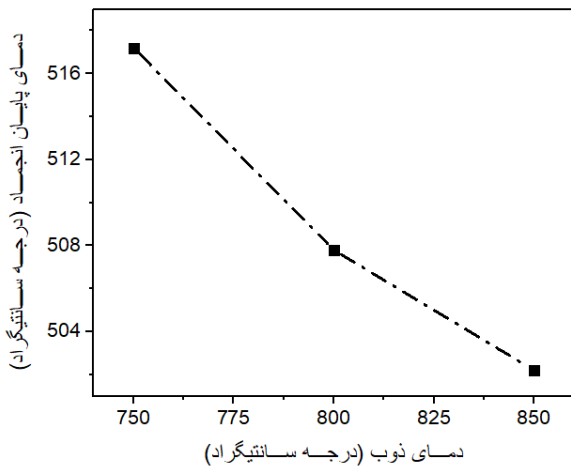
۳-۴- تأثیر دمای ذوب بر دمای پایان انجماد و دامنه انجماد

شکل (۳) و شکل (۴) به ترتیب تأثیر دمای ذوب را بر دمای پایان انجماد و دامنه انجماد نشان می دهند. با توجه به شکل (۳) مشاهده می شود که با افزایش دمای ذوب، دمای پایان انجماد کاهش می یابد. شکل (۴) نیز افزایش دامنه انجماد در اثر افزایش دمای ذوب را نشان می دهد. در بخش های قبل مشاهده شد که با افزایش دمای ذوب، دمای جوانه زنی فاز مقاوم ساز Mg₂Si افزایش می یابد و همچنین در شکل (۳) مشاهده می شود که با افزایش دمای ذوب، دمای پایان انجماد کاهش می یابد. بنابراین منطقی است که دامنه انجماد که حاصل اختلاف دمای جوانه زنی فاز اولیه و دمای پایان انجماد است، با افزایش دمای ذوب، افزایش یابد.

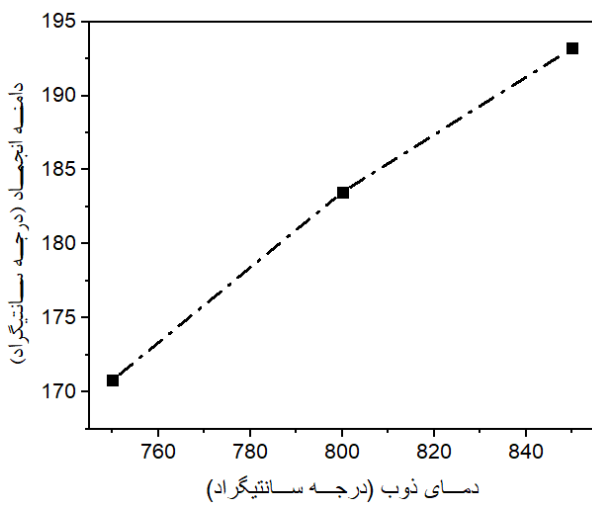
جدول ۳- تأثیر دماهای مختلف ذوب بر میزان تحت تبرید گرمابخشی در

کامپوزیت Al-20%Mg₂Si

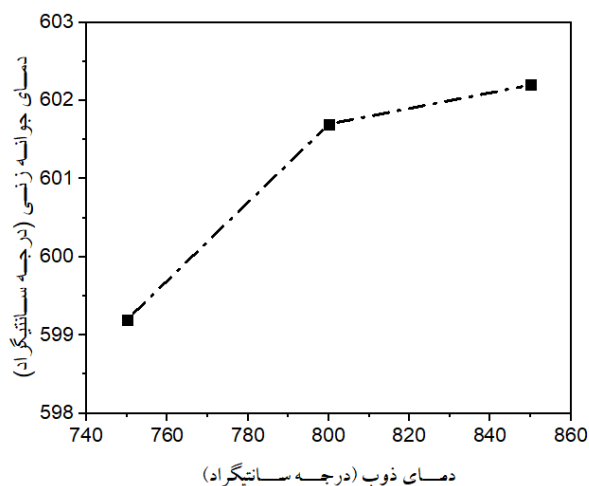
دمای ذوب (°C)	۷۵۰	۸۰۰	۸۵۰
تحت تبرید گرمابخشی (°C)	۴/۳	۳/۱	۰/۵



شکل ۳- تأثیر دمای ذوب بر دمای پایان انجماد



شکل ۴- تأثیر دمای ذوب بر دامنه انجماد



شکل ۵- تأثیر دمای ذوب بر دمای جوانه زنی واکنش یوتکتیک دوتایی α-Al + Mg₂Si

۳-۵- تأثیر مقدار دمای ذوب بر مشخصه های انجمادی واکنش

دوتایی α-Al + Mg₂Si

شکل (۵) تأثیر دمای ذوب بر دمای شروع واکنش یوتکتیک دوتایی α-Al + Mg₂Si را نشان می دهد. با توجه به این شکل مشاهده می شود که با افزایش دمای ذوب، دمای شروع واکنش

در تحقیق حاضر، افت دمای یوتکتیک دوتایی α -Al-Mg₂Si، به صورت اختلاف دمای رشد یوتکتیک نسبت به حالت با کمترین فوق ذوب (۷۵۰ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شده است. شکل (۷)، تغییرات افت دمای یوتکتیک دوتایی برحسب دماهای مختلف ذوب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش دمای ذوب، میزان افت دمای یوتکتیک افزایش می‌یابد. به این معنا که با افزایش دمای ذوب، ساختار یوتکتیک اصلاح شده است.

در خصوص علت این تغییرات دمایی در منطقه یوتکتیک می‌توان اشاره نمود که با افزایش دمای ذوب، ذرات Mg₂Si اولیه ریزتر می‌شود. در نتیجه مکان‌های بالقوه برای جوانه‌زنی فازهای یوتکتیک نیز افزایش یافته و ساختار یوتکتیک اصلاح می‌شود.

۳-۶- تأثیر دمای ذوب بر مشخصه‌های انجمادی واکنش

یوتکتیک سه‌تایی α -Al + Mg₂Si + Si

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از منحنی‌های سرد شدن در دماهای ذوب مختلف و در ناحیه مربوط به واکنش یوتکتیک سه‌تایی، مشخص شد که اعمال فوق ذوب در دماهای ۷۵۰، ۸۰۰ و ۸۵۰°C، اثر چندانی بر مشخصه‌های انجمادی واکنش یوتکتیک سه‌تایی ندارد. نتایج نشان می‌دهد که فوق ذوب بیشتر بر تشکیل فاز اولیه و یوتکتیک دوتایی که در دماهای بالاتر انجام می‌گیرند، مؤثر است.

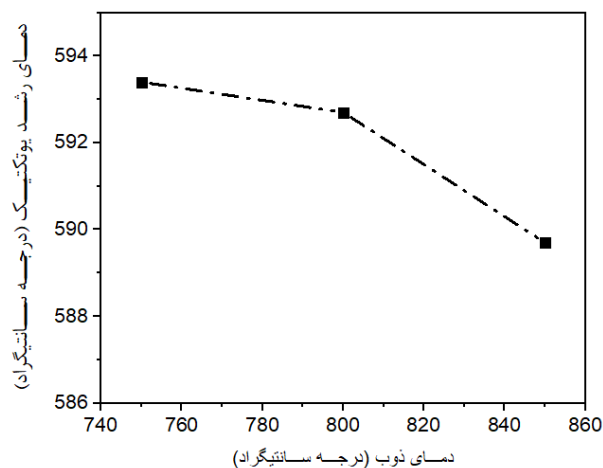
۳-۷- بررسی‌های ریزساختاری

ریزساختار کامپوزیت Al-20%Mg₂Si ریخته‌گری شده در دمای ۷۵۰°C، در قالب فلزی در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، ریزساختار کامپوزیت α -Al-Mg₂Si با اندکی سیلیسیم اضافه شامل ذرات اولیه، فاز α -Al + Mg₂Si دوتایی و فاز Si یوتکتیک است.

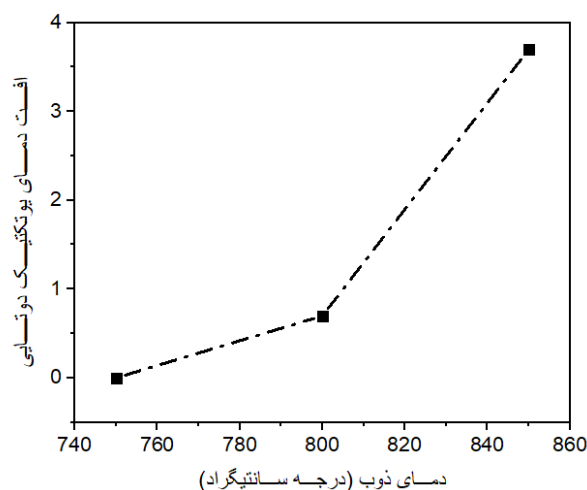
شکل (۹) ریزساختار کامپوزیت Al-20%Mg₂Si را در سه دمای ذوب ۷۵۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اعمال فوق ذوب به مذاب کامپوزیت بر ریزساختار آن مؤثر است. به طوری که با افزایش دمای ذوب از ۷۵۰ به ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، مورفولوژی ذرات Mg₂Si اولیه از دندریتی درشت و نامنظم به مورفولوژی منظم‌تر و در برخی مناطق به چندوجهی تبدیل شده و لبه‌های تیز این ذرات کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش دمای ذوب، حفرات

یوتکتیک افزایش می‌یابد. این افزایش دمای جوانه‌زنی می‌تواند به دلیل فعال شدن بسترهای مناسب بیشتر برای جوانه‌زنی فازهای یوتکتیک با افزایش دمای ذوب باشد. این بسترهای مناسب در واقع همان ذرات Mg₂Si اولیه هستند که افزایش دمای ذوب موجب سهولت در جوانه‌زنی این ذرات و در نتیجه افزایش تعداد آنها می‌گردد.

شکل (۶) کاهش دمای رشد دوتایی در اثر افزایش دمای ذوب را نشان می‌دهد. بسیاری از محققین به‌منظور بررسی میزان اصلاح ساختار یوتکتیک در آلیاژهای مختلف از متغیری تحت عنوان افت دمای یوتکتیک ($\Delta T_{G,E}$)^۱ که به صورت اختلاف دمای رشد یوتکتیک در حالت اصلاح شده و اصلاح نشده تعریف می‌شود، استفاده کرده‌اند [۲۲-۲۵]. بر اساس این تحقیقات، افت دمای واکنش یوتکتیک موجب اصلاح ساختار یوتکتیک می‌شود.



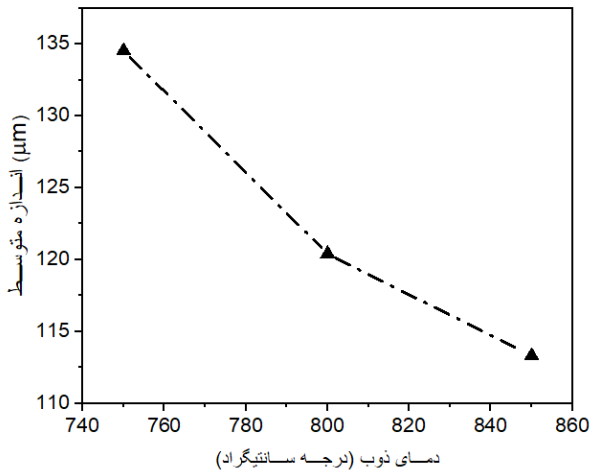
شکل ۶- تأثیر دمای ذوب بر دمای رشد واکنش دوتایی α -Al + Mg₂Si



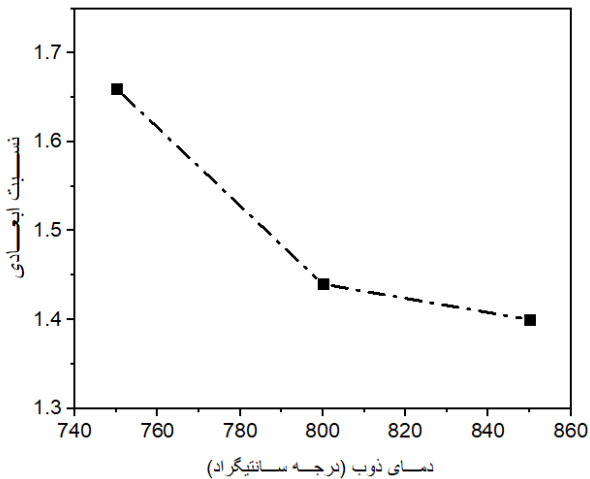
شکل ۷- تأثیر دمای ذوب بر افت دمای واکنش یوتکتیک دوتایی α -Al + Mg₂Si

¹ Eutectic growth undercooling

مکانیزم بهسازی ذرات Mg₂Si اولیه در اثر اعمال فوق ذوب می‌تواند به این صورت باشد که با افزایش دمای ذوب، حلالیت اتم‌های سیلیسیم در مذاب تحت دمای بالا، افزایش یافته و خوشه‌های اتمی و اندازه متوسط گروه‌های اتمی در مذاب کامپوزیت کاهش می‌یابد. کاهش در تعداد خوشه‌های اتمی که به‌عنوان مکان‌های مناسب برای جوانه‌زنی غیرهمگن عمل می‌کنند، به معنی کاهش در تعداد بسترهای مناسب برای جوانه‌زنی غیر همگن ذرات Mg₂Si اولیه است و موجب می‌شود تا تحت تبرید بیشتری برای جوانه‌زنی نیاز باشد. از سوی دیگر، افزایش تحت تبرید موجب افزایش سرعت جوانه‌زنی و کاهش شعاع بحرانی هسته‌ها می‌شود. در نتیجه اندازه ذرات Mg₂Si اولیه کاهش می‌یابد [۲۶-۲۸].

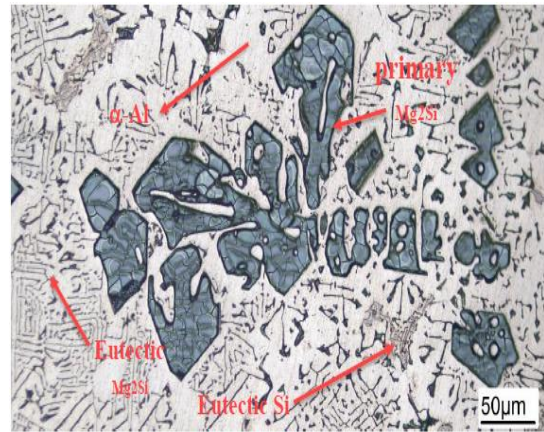


شکل ۱۰- تأثیر دمای ذوب بر متوسط اندازه ذرات Mg₂Si اولیه

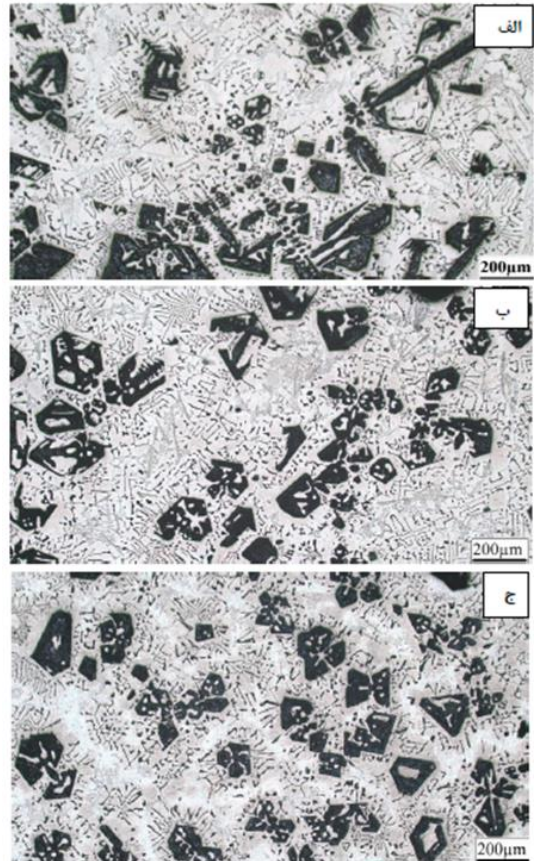


شکل ۱۱- تأثیر دمای ذوب بر مقدار متوسط نسبت ابعادی ذرات Mg₂Si اولیه

موجود در ساختار ذرات Mg₂Si اولیه ریزتر می‌شوند و توزیع این ذرات در زمینه کامپوزیت یکنواخت‌تر می‌شود. شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، اثر دمای ذوب بر مشخصات ریزساختاری Mg₂Si اولیه را نشان می‌دهند. با توجه به شکل (۱۰)، با افزایش دمای ذوب، متوسط اندازه ذرات از ۱۳۴/۵۳ μm به ۱۱۳/۳۱ μm کاهش می‌یابد و شکل (۱۱) نیز کاهش نسبت ابعادی ذرات مقاوم‌ساز را با افزایش دمای ذوب نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، ذرات Mg₂Si اولیه با اعمال فوق ذوب به مذاب بهبود یافته‌اند.



شکل ۸- ریزساختار کامپوزیت Al-20%Mg₂Si



شکل ۹- ریزساختار کامپوزیت Al- 20% Mg₂Si در دماهای ذوب:

(الف) ۷۵۰، (ب) ۸۰۰ و (ج) ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد

α -Al+Mg₂Si+Si در کامپوزیت Al-20%Mg₂Si از طریق منحنی سرد شدن تعیین شد.

۲- با افزایش دمای ذوب از ۷۵۰ به ۸۵۰°C، دمای جوانه‌زنی فاز Mg₂Si اولیه از ۶۸۷/۶ به ۶۹۰/۲°C افزایش می‌یابد. زیرا افزایش دمای ذوب، موجب افزایش سرعت فرایند نفوذ و سهولت در جوانه‌زنی و در نتیجه افزایش دمای جوانه‌زنی می‌شود.

۳- تحت تبرید گرمابخشی با افزایش دمای ذوب کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به سریع‌تر فعال شدن هسته‌های موجود در مذاب به خاطر سرعت نفوذ بالاتر در دماهای ذوب بالاتر و تسهیل شرایط رشد مرتبط دانست.

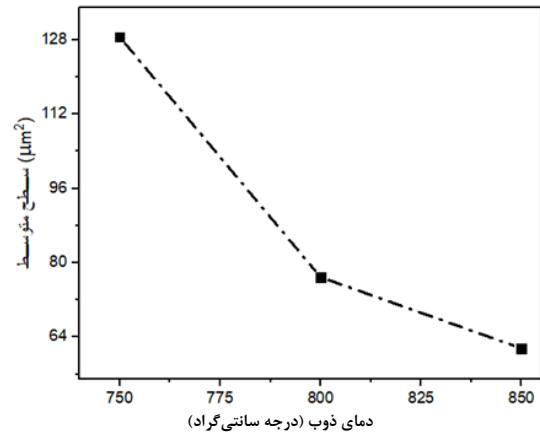
۴- با افزایش دمای ذوب، دمای جوانه‌زنی فاز مقاوم‌ساز Mg₂Si افزایش و دمای پایان انجماد کاهش و در نتیجه محدوده دمایی دامنه انجماد افزایش می‌یابد.

۵- با افزایش دمای ذوب، دمای شروع واکنش یوتکتیک دوتایی α -Al + Mg₂Si افزایش می‌یابد. در صورتی که، اعمال فوق ذوب در دماهای ۷۵۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر چندانی بر مشخصه‌های انجمادی واکنش یوتکتیک سه‌تایی α -Al + Mg₂Si ندارد.

۶- با افزایش دمای ذوب، اندازه و نسبت ابعادی فاز مقاوم‌ساز Mg₂Si کاهش یافته و توزیع آن‌ها در ساختار کامپوزیت یکنواخت‌تر می‌شود که این امر می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی گردد.

مراجع

- [1] Li C., Wu Y.Y., Li H., Liu X.F., Morphological evolution and growth mechanism of primary Mg₂Si phase in Al-Mg₂Si alloys, Acta Materialia, 59 (2011) 1058–1067.
- [2] Jing Q., Deng G., Liang Y., Modification microstructures in in-situ Mg₂Si reinforced Al-Si alloy composites, Advanced Materials Research, 2010, 139-141, 718–722.
- [3] Khorshidi R., Honarbakhsh Raouf A., Emamy M., Campbell J., The study of Li effect on the microstructure and tensile properties of cast Al-Mg₂Si metal matrix composite, Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509, 9026–9033.
- [4] Nadim A., Taghiabadi R., Razaghian A., Noghani M.T., Ghonvkeh M.H., Effect of Fe-impurity on tribological properties of Al-15Mg₂Si composite, Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Ed., 2018, 28, 1084–1093.
- [5] Saghafian H., Shabestari S.G., Ghoncheh M.H., Sahihi F., Wear Behavior of thixoformed Al-25wt%Mg₂Si composites produced by Slope Casting Method, Tribology Transactions, 2015, 58, 288–299.
- [6] Tong X., Zhang D., Wang K., Lin J., Liu Y., Shi Z., Li Y., Lin J., Wen C., Microstructure and mechanical properties of high-pressure-assisted solidification of in situ Al-Mg₂Si composites, Materials Science and Engineering: A, 2018, 733, 9–15.
- [7] Khorshidi R., Honarbakhsh-Raouf A., Mahmudi R., Effect of minor Gd addition on the microstructure and creep



شکل ۱۲- تأثیر دمای ذوب بر مقدار مساحت متوسط ذرات Mg₂Si یوتکتیک

با توجه به نتایج ارائه شده در بخش‌های (۳-۱ و ۳-۲)، مبنی بر افزایش دمای جوانه‌زنی فاز Mg₂Si اولیه و کاهش تحت تبرید گرمابخشی آن با افزایش دمای ذوب، کاهش اندازه ذرات مقاوم‌ساز Mg₂Si اولیه قابل پیش‌بینی بود. همچنین در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که با افزایش دمای ذوب از ۷۵۰ به ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، توزیع ذرات مقاوم‌ساز Mg₂Si در ساختار کامپوزیت یکنواخت‌تر شده و مناطق خوشه‌ای در ریزساختار کاهش یافته است که اثر مطلوبی بر خواص مکانیکی دارد. به این دلیل که با خوشه‌ای شدن ذرات در زمینه، تنش‌های موضعی افزایش می‌یابد و این خوشه‌ها مکان‌های مناسبی برای انتشار ترک از خوشه‌ای به خوشه دیگر هستند.

در بخش (۳-۴) تأثیر دمای ذوب بر دماهای مشخصه ناحیه یوتکتیک دوتایی مورد بررسی قرار گرفت و پیش‌بینی شد که با افزایش دمای ذوب، ساختار یوتکتیک اصلاح خواهد شد. شکل (۹) تأثیر دماهای مختلف ذوب بر ساختار یوتکتیک دوتایی α -Al + Mg₂Si را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش دمای ذوب از ۷۵۰ به ۸۵۰°C، تغییر چندانی در مورفولوژی Mg₂Si یوتکتیک رخ نمی‌دهد، اما ساختار یوتکتیک ریزتر شده و فواصل بین لایه‌ای کم‌تر می‌شود و همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، مساحت متوسط ذرات Mg₂Si یوتکتیک با افزایش دمای ذوب، به میزان قابل توجهی از ۱۲۸/۶ μm^2 به ۶۱/۵۴ μm^2 کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- تأثیر فوق ذوب بر رفتار انجمادی کامپوزیت درجا Al-Mg₂Si به روش آنالیز حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، تشکیل فاز مقاوم‌ساز Mg₂Si اولیه، واکنش یوتکتیک دوتایی α -Al + Mg₂Si و واکنش یوتکتیک سه‌تایی

- [23] Shabestari S.G., Ghodrati S., Assessment of modification and formation of intermetallic compounds in aluminum alloy using thermal analysis, *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 467, 150–158.
- [24] Farahany S., Ourdjini A., Idrisi M.H., Shabestari S.G., Evaluation of the effect of Bi, Sb, Sr and cooling condition on eutectic phases in an Al-Si-Cu alloy (ADC12) by in situ thermal analysis, *Thermochimica Acta*, 2013, 559, 59–68.
- [25] Tebib M., Samuel A.M., Ajersch F., Chen X.G., Effect of P and Sr additions on the microstructure of hypereutectic Al-15Si-14Mg-4Cu alloy, *Materials Characterization*, 2014, 89, 112–123.
- [26] Saffari S., Akhlaghi F., Influence of melt superheating on microstructure evolution in Al-Mg₂Si composites fabricated by gravity casting and vibrating cooling slope methods, Conference: Proceedings of Iran International Aluminum Conference (IIAC2014) At: Tehran, I.R. Iran, 2014.
- [27] Qin Q.D., Zhao Y.G., Liang Y.H., Zhou W., Effects of melt superheating treatment on microstructure of Mg 2Si/Al-Si-Cu composite, *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, 399, 106–109.
- [28] Zha M., Wang H.Y., Liu B., Zhao B., Liang M.L., Li D., Jiang Q.C., Influence of melt superheating on microstructures of Mg-35Si-1Al alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Ed.)*, 2008, 18.
- behavior of a cast Al-15Mg₂Si in situ composite, *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 718, 9–18.
- [8] Shabestari S.G., Malekan M., Assessment of the effect of grain refinement on the solidification characteristics of 319 aluminum alloy using thermal analysis, *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 492, 134–142.
- [9] Farahany S., Ourdjini A., Idrisi M.H., Shabestari S.G., Computer-aided cooling curve thermal analysis of near eutectic Al-Si-Cu-Fe alloy: Effect of silicon modifier/refiner and solidification conditions on the nucleation and growth of dendrites, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2013, 114(2) 705-717.
- [10] Backerud L., Chai G., Tamminen J., Solidification Characteristics of aluminum alloys, *Foundry Alloy*, 1990, 2, 266.
- [11] صحیحی ف.، بررسی خواص مکانیکی (سختی و سایش) کامپوزیت‌های Al-Mg₂Si تولید شده به روش نیمه‌جامد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۹.
- [12] یآوری ف.، بررسی تأثیر مقدار آلومینیم و سرعت سرد شدن بر رفتار انجمادی آلیاژهای منیزیم Mg-Al-Zn از طریق آنالیز حرارتی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۵.
- [13] Zhang J., Fan Z., Wang Y.Q., Zhou B.L., Equilibrium pseudobinary Al-Mg₂Si phase diagram, *Materials Science and Technology*, 2001, 17, 494–496.
- [14] Shabestari S.G., Saghafian H., Sahihi F., Ghoncheh M.H., Investigation on microstructure of Al-25wt-%Mg₂Si composite produced by slope casting and semi-solid forming, *Int. J. Cast Met. Res.*, 2015, 28, 158–166.
- [15] Li C., Wu Y., Li H., Liu X., Microstructural formation in hypereutectic Al-Mg₂Si with extra Si, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 477, 212–216.
- [16] Zhang J., Fan Z., Wang Y.Q., Zhou B.L., Microstructural evolution of the in situ Al-15wt%Mg₂Si composite with extra Si contents, *Scripta Materialia*, 2000, 42, 1101–1106.
- [17] Yang W., Yang X., Ji S., Melt superheating on the microstructure and mechanical properties of diecast Al-Mg-Si-Mn alloy, *Metals and Materials International*, 2015, 21, 382–390.
- [18] Liu Z., Xie M., Liu X.M., Microstructure and properties of in situ Al-Si-Mg₂Si composite prepared by melt superheating, *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 750–754.
- [19] Gao L., Liang S.M., Chen R.S., Han E.H., Correlation of recalescence with grain Refinement of Magnesium Alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Ed.)*, 2008, 18.
- [20] Malekan M., Shabestari S.G., Computer-aided cooling curve thermal analysis used to predict the quality of aluminum alloys, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 103 (2011) 453–458.
- [21] Du J., Shi Y.T., Li W.F., Assessment of solidification characteristics of carbon-inoculated Mg-3%Al melt by thermal analysis, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Ed.)*, (English Ed.), 2018, 28, 812–818.
- [22] Djurdjevic M., Jiang H., Sokolowski J., On-line prediction of aluminum-silicon eutectic modification level using thermal analysis, *Materials Characterization*, 2001, 46, 31–38.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper

Investigation on Effects of Melt Temperature on Solidification Behavior of in-situ Al-Mg₂Si Composite using Cooling Curve Thermal Analysis

Sahar Ashkevary¹, Saeed G. Shabestari^{2*}

1. M.Sc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST)

2. Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST)

* **Corresponding Author:** P.O. Box: 16846-13114, Tehran, Iran. Tel/Fax: (+9821)77451500-9, E-mail: shabestari@iust.ac.ir

Received 12 November 2019

Accepted 27 December 2019

Abstract:

The in-situ Al-Mg₂Si composites have attracted much attention in many important industries such as automotive and aerospace due to their low density, high specific strength, good wear resistance and thermal stability. In this research, solidification characteristics of in-situ Al-20%Mg₂Si composites has been investigated using cooling curve thermal analysis technique. For this purpose, the thermal analysis curves of this composite have been plotted at three different temperatures of 750, 800, 850°C and the effect of superheat on the solidification parameters has been investigated. The results demonstrated that the superheat temperature affect the nucleation and growth of primary Mg₂Si phase and the eutectic reaction. Increasing the heat temperature from 750 to 850°C, increases the nucleation temperature of primary Mg₂Si, solidification range and decreases the growth temperature of the binary eutectic reactions. The size and aspect ratio of Mg₂Si reinforcement phase decreases by increasing the superheat. Therefore, the distribution of these phases will be improved and it will promote better mechanical properties in the composite.

Keywords:

Thermal analysis,
In-situ Al-Mg₂Si composite,
Superheating,
Solidification parameters.

Please cite this article using:

Sahar Ashkevary, Saeed G. Shabestari, Investigation on Effects of Melt Temperature on Solidification Behavior of in-situ Al-Mg₂Si Composite using Cooling Curve Thermal Analysis, in Persian, Founding Research Journal, 2020, 4(1) 1-9.

DOI: 10.22034/FRJ.2019.208458.1107

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

