

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

تأثیر همزمان فوق‌گدازی مذاب و زمان نگهداری بر تغییرات ساختاری، مشخصه‌های انجمادی و سختی کامپوزیت Al-20Mg₂Si-2Cu

سعید فراهانی^{۱*}، نور ازما نوردین^۲، حمیدرضا قندور^۳

۱- استادیار، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲- استادیار، موسسه بین‌المللی تکنولوژی مالزی-ژاپن، دانشگاه تکنولوژی مالزی، کوالالمپور، مالزی.

۳- پسا دکترا، دانشگاه تکنولوژی مالزی، جوهور، مالزی.

* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۲۸۳۳۸۹۴، E-mail: s.farahani@bzeng.ikiu.ac.ir

چکیده:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

در این تحقیق تأثیر زمان‌های نگهداری مذاب برای مدت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه در فوق‌گدازی ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بر روی فازهای Mg₂Si_p اولیه، Mg₂Si_E یوتکتیکی، Al₅FeSi، Al₂Cu، Al₅Mg₈Si₆Cu₂، دمای تشکیل این فازها و نیز سختی کامپوزیت Al-20Mg₂Si-2Cu مورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات ریزساختاری و آنالیز کمی نشان داد که بهترین بهسازی در فوق‌گدازی ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان نگهداری ۱۵ دقیقه ایجاد شد. در مقایسه با نمونه مرجع که دارای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گدازی بود، شکل دندردیتی و خشن ذرات Mg₂Si_p به چندوجهی ریز تبدیل گردید. اندازه متوسط ذرات بطور چشمگیری از ۱۱۷۹ به ۲۵۵/۵ میکرومتر کاهش پیدا کرد. مساحت ذرات و نسبت ابعادی بترتیب به میزان ۸۳٪ و ۱۳٪ کاهش یافت. تعداد ذرات در واحد سطح از ۹ به ۵۷ افزایش پیدا کرد. فوق‌گدازی موجب تبدیل β-Fe سوزنی به فاز α-Fe خط‌چینی شد، هرچند تغییر محسوس در ویژگی فازهای Mg₂Si_E، Al₅Mg₈Si₆Cu₂ و Al₂Cu مشاهده نشد. ارتباط مناسبی بین دمای تشکیل و تغییر ساختاری فاز Mg₂Si_p یافت شد. پس از اعمال فوق‌گدازی ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه، دمای تشکیل فاز Mg₂Si_p از ۶۴۷/۳ به ۶۶۴/۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. کامپوزیت‌هایی که تحت عملیات فوق‌گدازی قرار گرفتند صرفنظر از دما و زمان، سختی بالاتری نسبت به نمونه مرجع نشان دادند. بیشترین سختی به میزان ۸۲/۱ ویکرز بدست آمد که می‌تواند مرتبط با افزایش تعداد ذرات و کاهش فاصله بین ذرات باشد.

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت،

Mg₂Si

فوق‌گدازی،

ریزساختار،

آنالیز حرارتی.

ارجاع به این مقاله:

سعید فراهانی، نور ازما نوردین، حمیدرضا قندور، تأثیر همزمان فوق‌گدازی مذاب و زمان نگهداری بر تغییرات ساختاری، مشخصه‌های انجمادی و سختی کامپوزیت

Al-20Mg₂Si-2Cu، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، تابستان ۱۴۰۰، جلد ۵، شماره ۲، صفحات ۹۳-۱۰۶.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/irj.2022.322231.1147

۱- مقدمه

(۴۵۰۰ MN.m⁻²) و نیز ضریب کشسانی بالا (۱۲۰ GPa) مهمترین تأثیر را بر خواص کامپوزیت‌های Al-Mg₂Si دارد [۲]. با توجه به استحکام ویژه و مقاومت به سایش بالا، کامپوزیت‌های Al-Mg₂Si در صنایع هوافضا، خودرو و حمل و نقل مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳،۴]. اما وجود ذرات درشت دندردیتی و نامنظم Mg₂Si_p در ساختار ریختگی منجر به تمرکز تنش در سطح مشترک بین فاز Mg₂Si_p و زمینه آلومینیمی می‌شود که استحکام مکانیکی و چقرمگی را کاهش می‌دهد. به همین دلیل کاربرد کامپوزیت‌های Al-Mg₂Si تاکنون محدود بوده است.

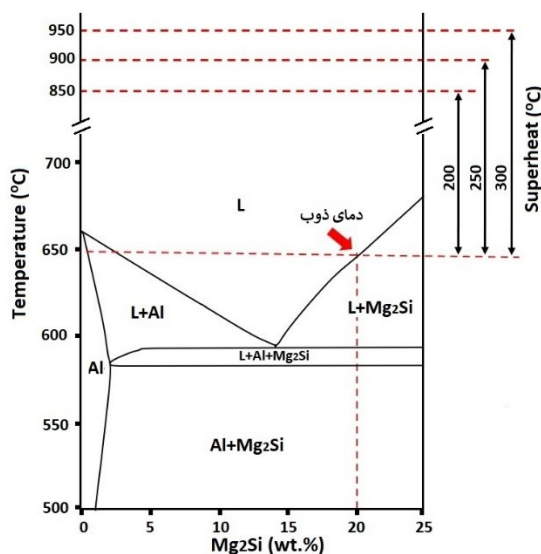
افزودن منیزیم و سیلیسیم با نسبت استوکیومتری مشخص به زمینه آلومینیمی موجب تشکیل ذرات تقویت کننده به دو صورت اولیه (Mg₂Si_p) و یوتکتیکی (Mg₂Si_E) در حین انجماد می‌شود که به آنها کامپوزیت‌های درجای زمینه آلومینیمی اطلاق می‌شود [۱]. به عنوان ذرات تقویت کننده، ترکیب بین فلزی Mg₂Si با خصوصیات جذاب فیزیکی و مکانیکی مانند نقطه ذوب بالا (۱۰۸۰ °C)، دانسیته کم (۱/۹۹×۱۰^۳ kg.m⁻³)، ضریب انبساط حرارتی کم (۷/۵×۱۰^{-۶} k⁻¹)، پایداری حرارتی عالی، سختی بالا

حاضر به منظور ارزیابی تاثیر همزمان دمای فوق‌گدازی و نیز زمان نگهداری مذاب بر روی ذرات تقویت‌کننده Mg₂Si_p اولیه، فاز یوتکتیک Mg₂Si_E، ترکیب بین‌فلزی Al₅FeSi، (Q) Al₅Mg₈Si₆Cu₂ و (Θ) Al₂Cu و همچنین مشخصه‌های انجمادی و نیز سختی کامپوزیت Al-20Mg₂Si-2Cu انجام شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

از شمش تجاری Al-20Mg₂Si-2Cu با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول (۱) به عنوان ماده اولیه این تحقیق استفاده شد. با قرار دادن ۴۰۰ گرم از تکه‌های شمش در بوتله یک لیتری SiC و با استفاده از کوره مقاومتی Nebertherm با توان ۲۶ کیلو وات مواد ذوب گردیدند. پس از ذوب شدن کامل، مذاب برای دماهای مشخص ۸۵۰، ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، بترتیب معادل با فوق‌گدازی ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه نگهداری گردید. لازم بذکر است که بر اساس دیاگرام فازی Al-Mg₂Si که در شکل (۱) نشان داده شده است و نیز بر اساس نتایج تحقیق حاضر، دمای ذوب Al-20Mg₂Si-2Cu حدود ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد است.

به منظور جلوگیری از اکسیدشدن در دماهای بالا، از دمش گاز آرگون استفاده شد. سپس دمای مذاب تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت و در قالب سرامیکی زیرکینی (شکل ۲) پیش‌گرم‌شده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد جهت انجام آنالیز حرارتی ریخته‌شد. آنالیز حرارتی منحنی سردشدن به منظور بررسی تغییرات دمای تشکیل فازهای مختلف در حین انجماد مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱- دیاگرام فازی Al-Mg₂Si که بر اساس مرجع [۲۷] دوباره رسم شده است، به همراه دمای ذوب و فوق‌گدازی ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد.

در سال‌های اخیر، روش‌های متعددی به منظور اصلاح مورفولوژی، اندازه و توزیع فاز Mg₂Si_p و در نتیجه بهبود عملکرد این کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این زمینه، افزودن عناصر بهساز و اصلاح‌کننده در حین ریخته‌گری [۵-۱۳]، عملیات حرارتی انحلالی [۱۴]، انجام کار مکانیکی [۲]، افزایش سرعت انجماد [۸، ۱۵] و اعمال جریان متناوب [۱۶] را می‌توان نام برد. در بین روش‌های ذکر شده، افزودن عناصر اصلاح‌کننده مرسوم‌ترین روش برای اصلاح فاز Mg₂Si_p است. اما گرانیگت بودن افزودنی‌ها، نیاز به اندازه‌گیری دقیق مقدار اصلاح‌کننده هنگام ورود به مذاب و همچنین واکنش عنصر اصلاح‌کننده با عناصر موجود در مذاب و تشکیل فازهای نامطلوب مشکلاتی است که موجب می‌شود که این روش همواره به نتیجه مطلوب منتهی نشود. لذا یافتن روش‌های جایگزین در این زمینه موضوع جذابی برای محققین بوده است.

استفاده از عملیات فوق‌گدازی یکی از این رویکردها است. فوق‌گداز تفاوت بین دمای مذاب با دمایی است که در آن هنگام سرد کردن اولین جوانه‌های جامد تشکیل می‌شوند. به خوبی شناخته شده است که اندازه، مورفولوژی و دمای مشخصه فازها در آلیاژ به طور قابل توجهی تحت تاثیر دمای بارریزی و میزان فوق‌گداز قرار می‌گیرد. به عنوان مثال نشان داده شده است که عملیات فوق‌گدازی بر روی ساختار سوپرآلیاژها [۱۷-۱۹] تاثیرگذار است. پانگ و همکارانش [۲۰] نشان دادند که با افزایش دمای بارریزی در آلیاژ Mg-10Gd-3Y-0.4Zr ساختار فاز یوتکتیکی تغییر کرده و خواص مکانیکی بهبود می‌یابد. همچنین مشاهده شد که عملیات فوق‌گدازی به کاهش اثرات مضر ناخالصی‌های آهن در آلیاژهای Al-Si به دلیل انتقال آن به مورفولوژی مطلوب تر کمک می‌کند [۲۱، ۲۲]. گزارش شده است که عملیات فوق‌گدازی بر روی مذاب، موجب افزایش بازدهی فرایند ریزکنندگی سیلیسیم اولیه در آلیاژهای هایپر یوتکتیک Al-16Si و Al-50Si می‌شود [۲۳، ۲۴] که از آن جهت که به سیستم فازی آلیاژ هایپر یوتکتیک Al-20Mg₂Si مورد مطالعه در این تحقیق نزدیک است جالب توجه است. کین و همکارانش [۲۵] یافتند که فوق‌گدازی موجب تغییر مورفولوژی و کاهش اندازه Mg₂Si_p می‌شود. شبستری و همکارانش [۲۶] گزارش کردند که اعمال فوق‌گدازی تاثیر چشمگیری بر روی مورفولوژی ذرات Mg₂Si_p دارد. در تحقیقات صورت گرفته، توجه محققین بیشتر بر روی تاثیر دمای بارریزی بر روی فاز Mg₂Si_p بوده است و کمتر فازهای دیگر مورد بررسی قرار گرفتند. علاوه بر این، زمان نگهداری مذاب در دماهای مربوطه نیز پارامتر مهمی در تشکیل ساختار نهایی کامپوزیت است که می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. لذا تحقیق

۶ نقطه متفاوت انجام گردید. به منظور تشخیص فازهای موجود در کامپوزیت، از دستگاه پراش پرتو ایکس Siemens-D500 با پرتو تکفاز Cu Ka استفاده شد. نمونه‌های متالوگرافی به روش استاندارد از نمونه‌های آنالیز حرارتی انتخاب و آماده سازی شدند. پس از پولیش نهایی با محلول جامد معلق سیلیکا، نمونه‌ها بوسیله محلول ۲٪ اسید فلئوئوریدریک حکاکی گردیدند. ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری (Nikon-MIDROPHOT-FXL) و بوسیله نرم‌افزار تحلیلگر تصویر i-Solution مورد بررسی و ارزیابی کمی قرار گرفت. حداقل از هشت تصویر برای ارزیابی کمی استفاده شد و میانگین اندازه، مساحت، نسبت ابعادی و تعداد ذرات گزارش گردید. به منظور مقایسه نتایج بدست آمده، شرایط بارریزی در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گاز) و بدون زمان نگهداری به عنوان حالت مرجع در نظر گرفته شد.

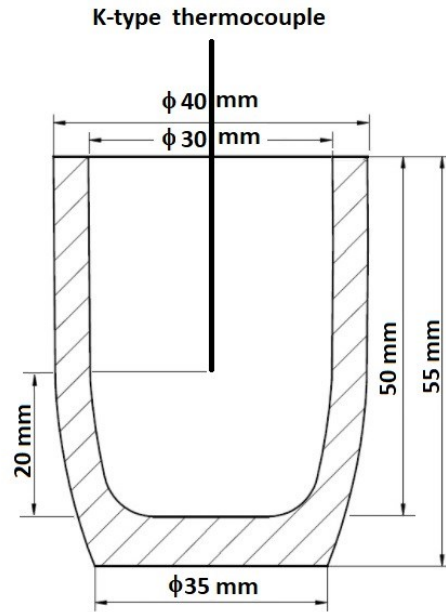
۳- نتایج

۳-۱- بررسی فازی

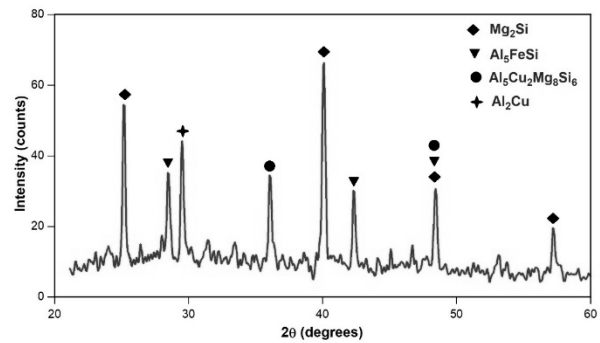
شکل (۳) پراش پرتو ایکس کامپوزیت Al-20Mg₂Si-2Cu را نشان می‌دهد. از آنجائیکه پیک‌های آلومینیم قوی بوده و با برخی از فازها هم‌پوشانی دارد لذا بوسیله محلول ۲۰٪ اسید کلریدریک و ۸۰٪ اتانول آلومینیم زمینه حذف گردید تا بتوان دقیق‌تر تمامی فازها را شناسایی نمود. نتایج پراش اشعه ایکس نشان می‌دهد که صرفنظر از آلومینیم زمینه، فازهای Mg₂Si، Al₅FeSi، Al₂Cu و Al₅Mg₈Si₆Cu₂ در ساختار وجود دارند.

۳-۲- بررسی ریزساختار

شکل (۴) تغییرات ریزساختار ذرات Mg₂Si_p را در اثر تغییر در فوق‌گاز (۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان نگهداری (۱۵-۴۵ دقیقه) نشان می‌دهد. ساختار Mg₂Si_p در نمونه مرجع بصورت دندریتی و خشن است (شکل ۴-الف). می‌توان مشاهده کرد که اعمال فوق‌گدازی بر روی مذاب کامپوزیت Al-20Mg₂Si-2Cu می‌تواند ساختار خشن دندریتی و نامنظم Mg₂Si_p را بهبود بخشد. همانطور که در شکل (۴-ب-۱) مشاهده شد، افزایش فوق‌گاز به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد منجر به تغییر اولیه مورفولوژی ذرات Mg₂Si_p از اسکلتی بزرگ و دندریتی شکل به ذرات کوچکتر شده است. بازوی اسکلت و انتهای تیز ذرات شروع به محو شدن کرده‌اند و به شکل چندوجهی درآمده‌اند. به طور خاص، فوق‌گاز ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و برای ۱۵ دقیقه زمان نگهداری مذاب، تبدیل ذرات Mg₂Si_p به ذرات چندضلعی کوچکتر دیده می‌شود. اما برخی از ذرات همچنان ساختار درشت دارند.



شکل ۲- قالب سرامیکی مورد استفاده برای آنالیز حرارتی همراه با ترموکوپل قرار داده شده در مرکز قالب.

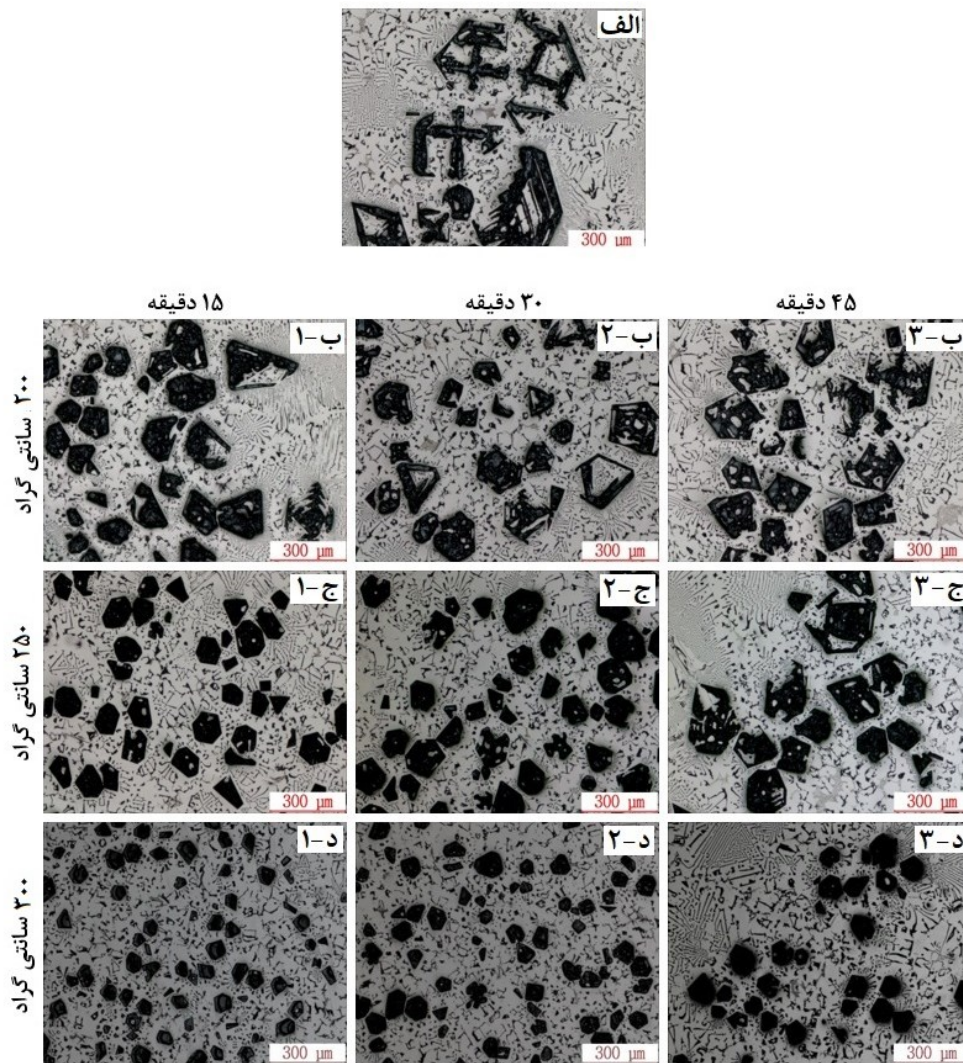


شکل ۳- الگوی پراش پرتو ایکس کامپوزیت Al-20Mg₂Si-2Cu مورد استفاده در این پژوهش.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی کامپوزیت Al-20Mg₂Si-2Cu مورد استفاده در این تحقیق.

عنصر	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Al
درصد وزنی	۷/۳۰	۲/۰۳	۰/۶۵	۰/۲۰	۱۳/۹۷	Bal.

ترموکوپل نوع k در مرکز، ۲۰ میلی متری از کف قالب تعبیه شد تا تغییرات دما-زمان را ثبت نماید که در شکل (۲) نشان داده شده است. داده‌ها با استفاده از دستگاه جمع‌آوری کننده اطلاعات Krypton که به رایانه مجهز به نرم افزار DEWESoft 7.5 متصل بود با نرخ ۱۰۰ S/sec برای هر کانال ثبت گردید و سپس توسط نرم‌افزار آنالیزگر اطلاعات (FlexPro10) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. برای اطمینان از نتایج، آنالیز حرارتی برای هر آلیاژ ۳ بار تکرار شد. اندازه‌گیری سختی به روش ویکرز با استفاده از دستگاه Matsuzawa DVK-2 با اعمال بار ۵ نیوتن در مدت ۱۰ ثانیه در



شکل ۴- ساختار فاز Mg₂Si (الف) در نمونه مرجع و (ب-۱ تا د-۳) پس از اعمال فوق‌گدازی و زمان نگهداری متفاوت.

مشابهی مشاهده گردید. بهسازی ذرات Mg₂Si در مقایسه با فوق‌گدازی ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بهبود یافت. وقتی مذاب در فوق‌گداز ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۱۵ دقیقه نگهداشته شد، تغییرات چشمگیری در ذرات Mg₂Si مشاهده گردید. ذرات بصورت چندضلعی‌های کوچکتری نسبت به حالت‌های قبل مشاهده شدند (شکل ۴-د-۱). اندازه ذرات در این حالت بیشترین کاهش را نشان داد. ساختارهای اسکلتی یا دندریتی در نمونه مشاهده نشد. با افزایش مدت زمان نگهداری مذاب به ۳۰ دقیقه ذرات همچنان بصورت چند ضلعی باقی ماندند. هرچند اندازه آنها اندکی افزایش یافت که در شکل (۴-د-۲) مشاهده می‌شود. برای زمان نگهداری طولانی‌تر (۴۵ دقیقه) اندازه ذرات به طور پیوسته افزایش یافت (شکل ۴-د-۳). بر اساس مشاهدات ریزساختاری می‌توان نتیجه‌گیری نمود که فوق‌گداز بالاتر با زمان نگهداری کوتاه‌تر اثر بهسازی بهتری بر روی ذرات Mg₂Si دارد. صرف نظر از میزان فوق‌گدازی، زمان نگهداری کمتر، یعنی ۱۵ دقیقه بهسازی بهتری را نشان داد.

با این حال، با افزایش زمان نگهداری به ۳۰ و ۴۵ دقیقه، بتدریج، ذرات درشت‌تر می‌شوند و اشکال توخالی به ترتیب در شکل‌های (۴-ب-۲) و (۴-ب-۳) به وضوح ظاهر می‌شوند. هنگامی که فوق‌گداز به ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت، اثر بهسازی بیشتری در ذرات Mg₂Si در مقایسه با فوق‌گداز ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. به طور مشابه برای مدت زمان نگهداری کمتر یعنی ۱۵ دقیقه، تاثیر بهتری در فوق‌گدازی ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد داشت. برای مدت زمان نگهداری ۱۵ دقیقه بیشتر ذرات به شکل چندوجهی ظاهر شده و اندازه آنها نیز کوچکتر شد که در شکل (۴-ج-۱) مشاهده می‌شود. فقط تعداد کمی از ذرات به شکل توخالی مشاهده شدند. با این حال، با افزایش زمان نگهداری مذاب به ۳۰ دقیقه (شکل ۴-ج-۲)، مشاهده شد که اندازه ذرات افزایش یافته و ساختار به درشت‌تر تغییر می‌کند. در مدت زمان ۴۵ دقیقه، ذرات دوباره به شکل اسکلت نمایان شدند، همانطور که در شکل (۴-ج-۳) نشان داده شده است. هنگامی که فوق‌گداز تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت، پدیده

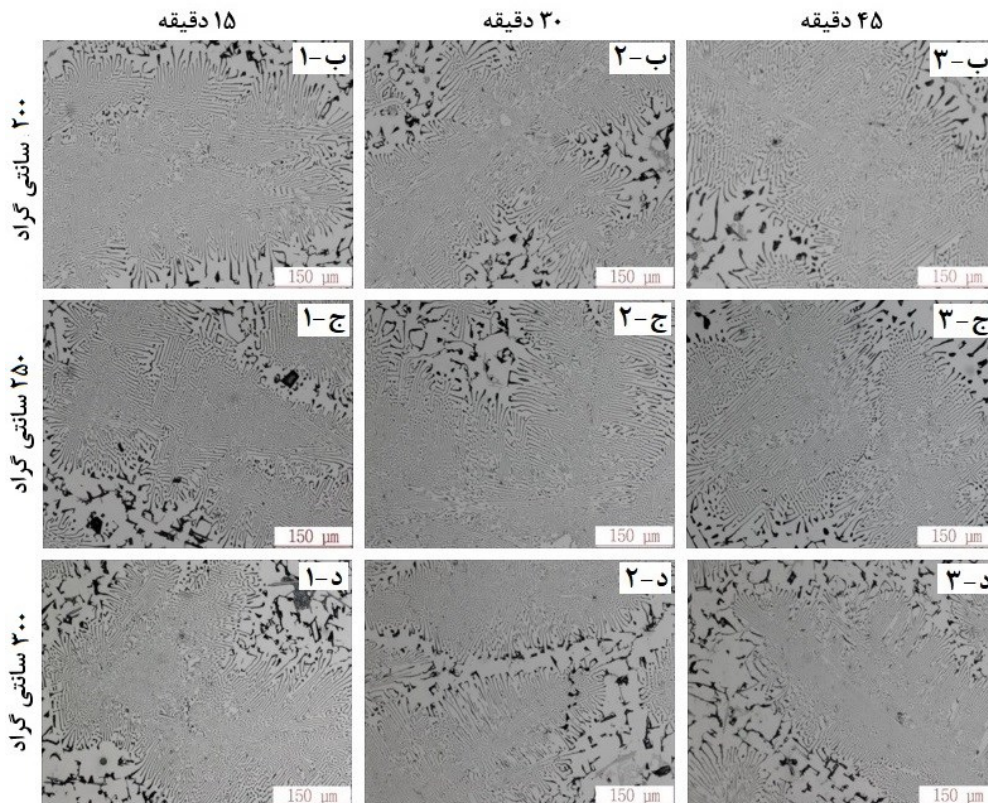
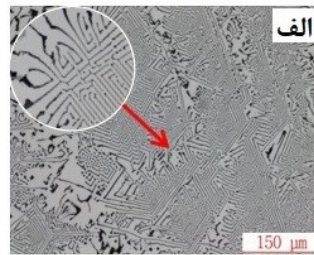
دیده می‌شود که Mg_2SiE پوسته‌ای و نازک را احاطه کرده‌اند. از مشاهدات ریزساختاری مشخص است که نه تغییر فوق‌گذازی و نه مدت زمان نگهداری تاثیری بر فاز یوتکتیکی ندارند.

شکل (۶) تغییرات فاز غنی از آهن $\beta-Fe$ را پس از عملیات فوق‌گذازی و زمان‌های نگهداری متفاوت نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۶-الف) نشان داده شده است $\beta-Fe$ در کامپوزیت $Al-20Mg_2Si-2Cu$ به شکل صفحه تیز، نازک با مقطع سوزنی شکل است که تمرکز تنش ایجاد کرده و منجر به افت خواص کامپوزیت درجا می‌شود. این فاز پس از تشکیل Mg_2SiE از مذاب باقیمانده جوانه می‌زند و معمولاً در مرز سلول‌های یوتکتیکی دیده می‌شود. از نظر عملی جلوگیری از تشکیل این ترکیب بدلیل استفاده از مواد برگشتی در تولید شمش‌های تجاری دشوار است.

بنابراین، تغییر مورفولوژی $\beta-Fe$ سوزنی راهی برای بهبود خواص مربوطه است که با افزودن مقدار کمی عناصر واسطه مانند منگنز، کروم، مس و کبالت صورت می‌گیرد [۲۸].

نتایج بدست آمده مطابقت خوبی با یافته‌های کین و همکارانش [۲۵] برای بارریزی در دمای $1020^\circ C$ درجه سانتی‌گراد و مدت ۲۰ دقیقه دارد.

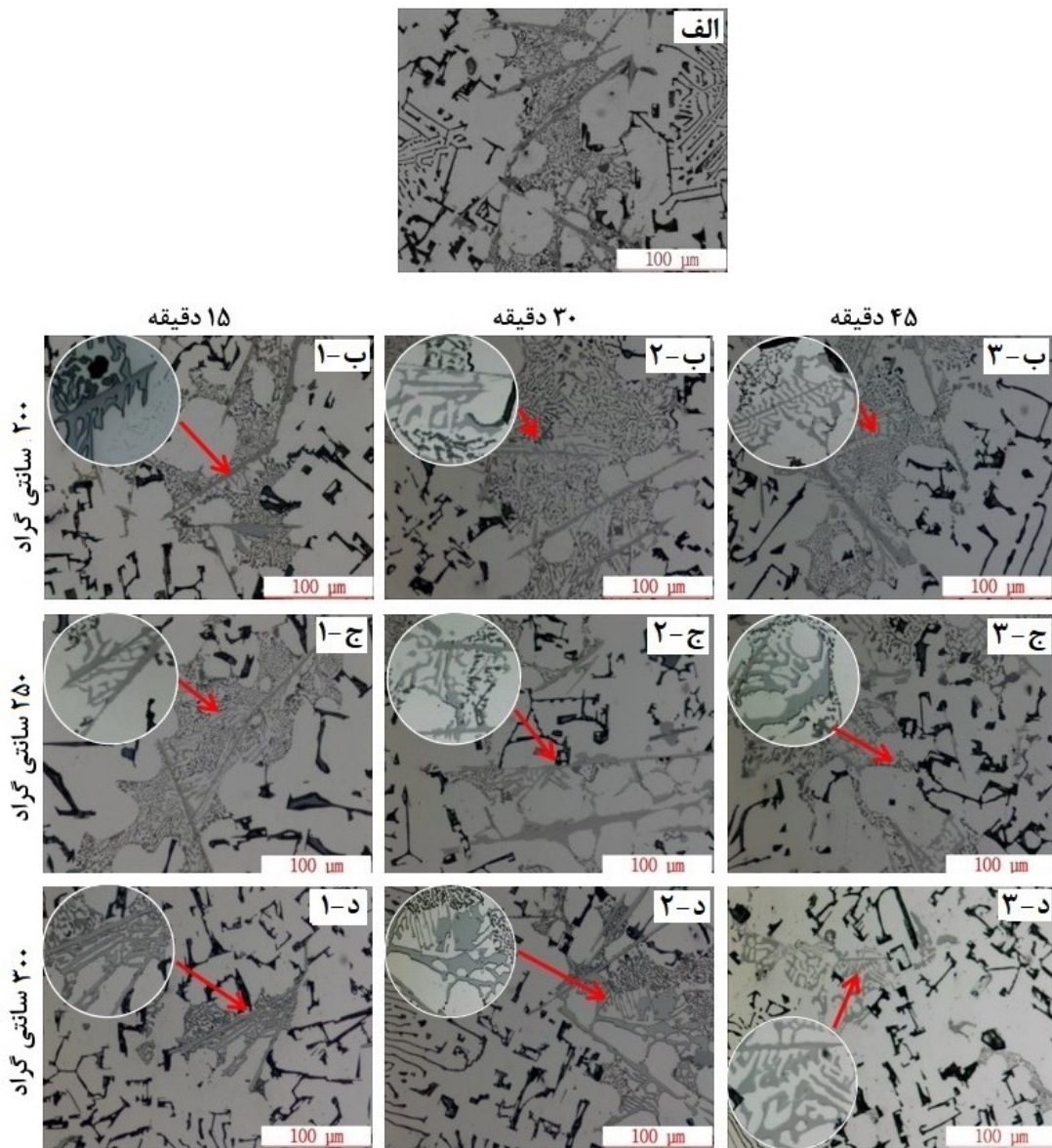
تأثیر فوق‌گذاز و زمان نگهداری بر فاز یوتکتیکی Mg_2SiE در شکل (۵) نشان داده شده است. فاز یوتکتیک Mg_2SiE بصورت پوسته‌ای مانند وجود دارد که سطح مقطع آنها بصورت موازی یکدیگر دیده می‌شود. این ساختار یوتکتیکی بصورت سلولی شکل می‌گیرد که در مرکز آن پوسته‌ای نازک قرار دارد و در مرز سلول‌ها بصورت تکه‌های درشت‌تر دیده می‌شوند که در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. همانطور که از شکل‌های (۵-ب-۱) تا (۵-د-۳) دیده می‌شود، فوق‌گذازی مختلف (۲۰۰ تا $300^\circ C$ درجه سانتی‌گراد) و زمان نگهداری مختلف مذاب (۱۵ تا ۴۵ دقیقه) تأثیر چشمگیری بر تغییر شکل فاز یوتکتیک ندارد. به طور خاص، Mg_2SiE هنوز در ساختار پوسته‌ای مانند در همه شرایط دمایی و زمانی وجود دارد. همچنان فاز یوتکتیکی بصورت سلولی است که در مرز آن Mg_2SiE بصورت ذرات درشت‌تری



شکل ۵- ساختار فاز Mg_2SiE در (الف) نمونه مرجع و (ب-۱ تا د-۳) پس از اعمال فوق‌گذازی و زمان نگهداری متفاوت.

جدیدی ظاهر می‌شود (شکل ۶-ب-۳) که به آن فسیلی شکل^۲ اطلاق می‌شود که به عنوان نوعی از حالت خط چینی فاز α -Fe گزارش شده است [۳۰-۳۳]. با این وجود، هنوز تعدادی دوقلوی آهن به شکل سوزنی در ساختار کامپوزیت وجود دارد. می‌توان گفت که ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گدازی و زمان نگهداری ۴۵ دقیقه هنوز برای ایجاد تغییر کامل در β -Fe کافی نیست. با افزایش فوق‌گداز به ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و برای مدت زمان نگهداری ۱۵ دقیقه، شاخه‌های منشعب شده از β -Fe واضح‌تر دیده می‌شوند (شکل ۶-ج-۱). می‌توان مشاهده کرد که β -Fe شروع به تبدیل شدن به دوقلویی و نیز α -Fe کرده است. با افزایش بیشتر زمان نگهداری مذاب به ۳۰ دقیقه، به آرامی ساختار به α -Fe خط‌چینی تبدیل می‌شود که در شکل ۶-ج-۲ نشان داده شده است.

علاوه بر این گزارش شده است که عملیات فوق‌گدازی بر روی آلیاژ Al-Si باعث اصلاح و تبدیل β -Fe سوزنی به فاز α -Fe خط‌چینی شده است [۲۹]. از شکل ۶-ب-۱ پس از ۱۵ دقیقه در ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گدازی می‌توان مشاهده کرد که β -Fe بین فلزی دارای شاخه‌هایی است که شروع به جوانه‌زنی جانبی کرده‌اند. با افزایش زمان نگهداری به ۳۰ دقیقه، تغییر شکل واضح‌تری دیده می‌شود (شکل ۶-ب-۲). زیرا تشکیل بازوی جدیدی در راستای بازوی اصلی مشاهده می‌شود. این مورفولوژی توسط تیلور [۳۰] و تبیب [۳۱] به عنوان فاز آهن دوقلو^۱ معرفی شده است که از ساختار β -Fe سوزنی بوجود می‌آید. علاوه بر این، شاخه‌هایی که از β -Fe جوانه زده‌اند نیز رشد کرده‌اند. اعتقاد بر این است که β -Fe دوقلویی مرحله انتقالی برای تشکیل نوع α -Fe خط‌چینی است. با افزایش زمان نگهداری به ۴۵ دقیقه، شکل



شکل ۶- ساختار فازهای غنی از آهن الف) در نمونه مرجع و (ب-۱ تا د-۳) پس از اعمال فوق‌گدازی و زمان نگهداری متفاوت.

^۲ Fossil-shape

^۱ Twin platelet

پراش اشعه ایکس مذاب‌های چند جزئی در سیستم آلیاژی Al-Si، Al-Fe و Al-Ti نشان داد که نظم کم‌دامنه بستگی به دمای مذاب دارد. در نزدیکی دمای ذوب، مذاب ساختار غیر یکنواختی دارد که با اعمال فوق‌گداز بهبود می‌یابد. بنابراین در حین سرد شدن پیوندهای جدیدی بین اتم‌ها بوجود می‌آید و خوشه‌های اتمی جدیدی از مذاب یکنواخت‌تر ایجاد می‌شود [۳۴]. ژو و فان [۳۵] با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی نشان دادند که با افزایش فوق‌گداز خوشه‌های اتمی که اندازه کمتری دارند نیز می‌توانند تبدیل به مکان‌های پایداری برای جوانه‌زنی شوند. در واقع در اثر فوق‌گداز میزان تحت‌انجماد افزایش و در نتیجه شعاع جوانه‌زنی بحرانی کاهش می‌یابد. علاوه بر این افزایش نرخ جوانه‌زنی موجب افزایش تعداد دانه‌هایی می‌شود که بطور همزمان در حال رشد کردن هستند. بنابراین زمان رشد فاز کاهش می‌یابد و اندازه فاز کوچکتر می‌شود. بنظر می‌رسد که تشکیل ساختارهای ریزتر در اثر عملیات فوق‌گداز، بیشتر مرتبط به تغییر در میزان تحت‌انجماد و یکنواختی ساختار اتمی مذاب باشد که هر دو تاثیر بسزایی بر ویژگی‌های تبلور دارند. ژو و همکارانش [۳۶] بیان نمودند که همگن شدن مذاب در حین عملیات فوق‌گداز مذاب با انحلال خوشه‌های اتمی همراه است که منجر به افزایش تحت‌انجماد می‌شود. بنابراین افزایش یکنواختی اتمی شرایط ترمودینامیکی تبلور را تغییر می‌دهد و در نتیجه آلیاژی با فاز و ترکیب ساختاری منظم‌تر تولید می‌شود [۳۷].

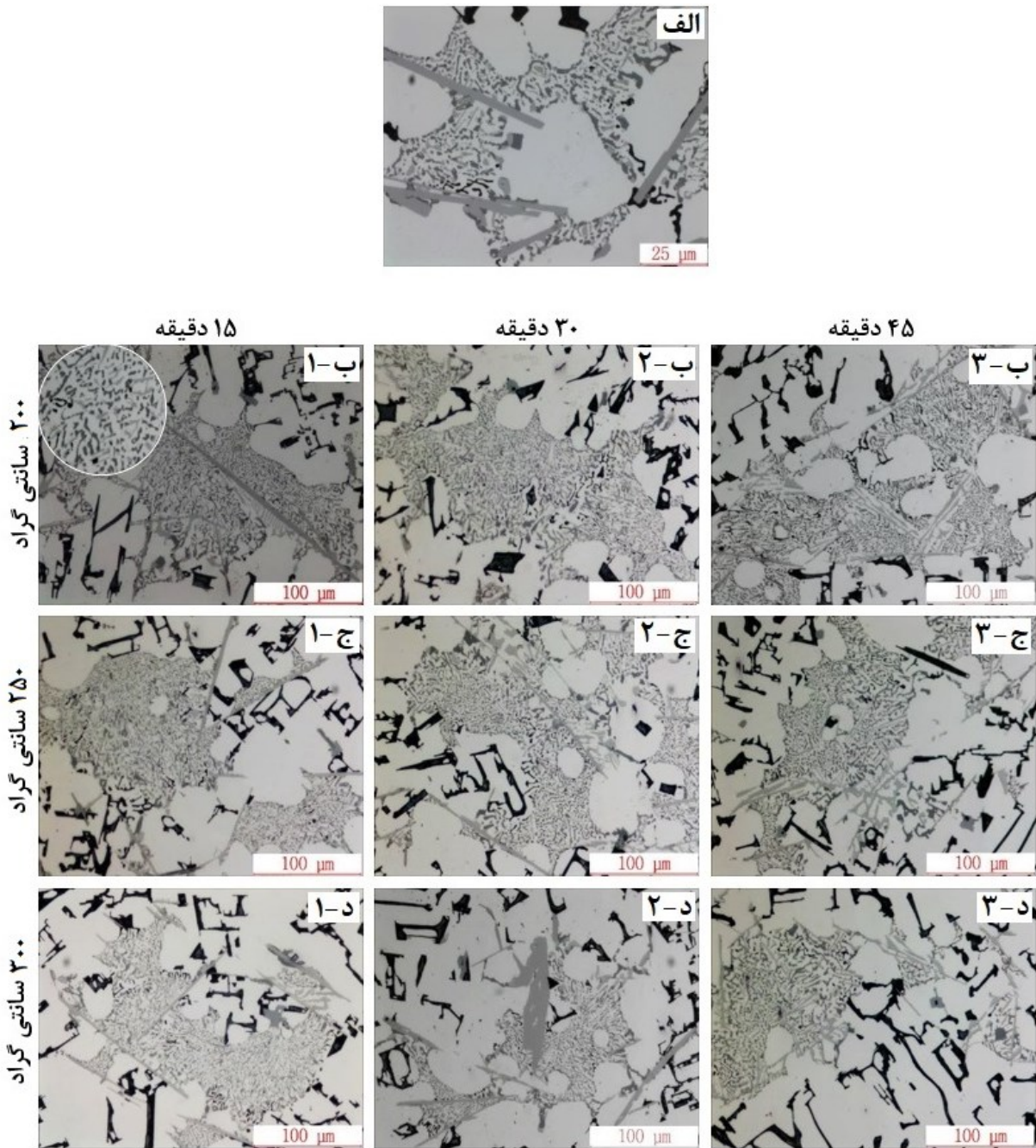
۳-۳- تحلیل کمی ریزساختار

از آنجائیکه فاز Mg_2SiP مهمترین نقش را در تعیین خواص کامپوزیت دارد، ویژگی‌های ذرات Mg_2SiP شامل اندازه، مساحت، نسبت ابعادی و تعداد ذرات با استفاده از نرم‌افزار آنالیزگر تصویر محاسبه گردید که در شکل (۸) نشان داده شده است. شکل (۸-الف) تغییرات اندازه ذرات را بر اساس میزان فوق‌گداز و زمان نگهداری نشان می‌دهد. به طور خلاصه، متوسط اندازه ذرات Mg_2SiP برای تمام فوق‌گدازهای ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان نگهداری ۱۵ تا ۴۵ دقیقه در مقایسه با حالت مرجع کاهش یافته است. به عنوان مثال، عملیات ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گداز برای مدت ۱۵ دقیقه موجب کاهش اندازه ذرات از حدود ۱۱۷۹ میکرومتر به ۷۶۰/۷ میکرومتر، یعنی کاهش ۳۵٪ شد. با این حال، در زمان‌های طولانی‌تر یعنی ۳۰ و ۴۵ دقیقه مجدداً اندازه ذرات افزایش یافت و بترتیب به ۱۰۸۳ و ۱۰۹۸ میکرومتر رسید. با این وجود، با افزایش بیشتر فوق‌گداز به ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش بیشتری در اندازه ذرات Mg_2SiP مشاهده شد.

اگرچه هنوز فاز آهن دوقلویی هم وجود دارد. با افزایش زمان به ۴۵ دقیقه، β -Fe سوزنی ناپدید شده و به طور کامل به فاز α -Fe خط چینی ظریف‌تر تبدیل می‌شود (شکل ۶-ج-۳). در مقایسه با ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گداز، بنظر میرسد که ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گداز اثر اصلاحی بهتری بر روی فاز β -Fe ایجاد می‌کند. در حالت ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گداز بطور مشابه تبدیل β -Fe سوزنی به ساختار α -Fe حتی در زمان نگهداری ۱۵ دقیقه مشاهده می‌شود (شکل ۶-د-۱). کاملاً مشخص است که شاخه‌هایی در کنار ساختار سوزنی در حال ایجاد شدن است که میزان شاخه‌های شدن بیشتر از حالت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۶-ب-۱) و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۶-ج-۱) فوق‌گداز برای مدت زمان مشابه است. با افزایش زمان نگهداری به ۳۰ دقیقه، ساختار فازهای آهن مشابه آنچه که برای فوق‌گداز ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت ۴۵ دقیقه مشاهده گردید، است (شکل ۶-د-۲). از شکل (۶-د-۳) مشاهده می‌شود که با افزایش زمان نگهداری به ۴۵ دقیقه برای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گداز، فاز غنی از آهن به طور کامل به فاز α -Fe خط چینی تبدیل شده است. گرچه میزان فوق‌گداز در زمانهای مختلف باعث تشکیل α -Fe شد اما بنظر میرسد عامل زمان تاثیر بیشتری نسبت به افزایش دما دارد. از آنجائیکه این دگرگونی یک تغییر حالت نفوذی است علاوه بر انرژی فعال‌سازی حرارتی، نیاز به زمان کافی جهت تبدیل β -Fe به α -Fe می‌باشد. گزارش شده است که α -Fe خط چینی بجای نوع β -Fe در اثر حرارت دهی بالای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ایجاد می‌شود و اندازه این ترکیبات آهن با افزایش میزان فوق‌گداز کاهش می‌یابد [۳۴].

ارزیابی تاثیر عملیات فوق‌گداز بر روی فازهای موجود در کامپوزیت با بررسی تغییرات در فازهای $Q (Al_5Mg_8Si_6Cu)$ و $\Theta (Al_2Cu)$ به عنوان آخرین فازهایی که ایجاد می‌شوند ادامه یافت. این دو فاز بصورت تیره (Q) و خاکستری روشن (Θ) و بصورت درهم مشاهده می‌شوند که اغلب فاز β -Fe را احاطه کرده‌اند (شکل ۷-الف). شکل‌های (۷-ب-۱) تا (۷-د-۳) تاثیر مقدار فوق‌گداز و زمان نگهداری را بر روی این دو فاز نشان می‌دهد. از مقایسه شکل‌ها مشخص است که تغییر فوق‌گداز و نیز مدت زمان نگهداری تاثیر محسوسی بر روی ساختار این دو فاز نداشته است.

مکانیزم تاثیر فوق‌گداز مذاب بر روی ساختار آلیاژهای ریخته‌گری همچنان مورد بحث است. هرچند که ارتباط نزدیکی با مفاهیم ساختار مذاب آلیاژ دارد. این دیدگاه به طور گسترده پذیرفته شده است که مذاب دارای نظم کم‌دامنه است که به تدریج با تغییر دما از نقطه ذوب تا دماهای بالاتر تغییر می‌کند.



شکل ۷- ساختار فازهای Q (Al₃Mg₈Si₆Cu) و θ (Al₂Cu) در نمونه مرجع و (ب-۱ تا د-۳) پس از اعمال فوق‌گدازی و زمان نگهداری متفاوت.

زمان نگهداری به ۳۰ و ۴۵ دقیقه اندازه ذرات مجدداً افزایش یافت و بترتیب به ۲۸۴ و ۳۴۰ میکرومتر رسید. در واقع افزایش فوق‌گدازی اثر بیشتری بر روی بهسازی ذرات Mg₂SiP دارد. اما زمان نگهداری طولانی‌تر باعث از دست رفتن بهسازی می‌شود. همراستا با کاهش اندازه ذرات Mg₂SiP، متوسط مساحت ذرات نیز کاهش یافت که در شکل (۸-ب) نشان داده شده است. با فرض اینکه مساحت Mg₂SiP در نمونه مرجع ۱ است، پس از انجام عملیات فوق‌گدازی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در ۱۵ دقیقه، مساحت نرمال شده ذرات به ۰/۷۳ کاهش یافته است. با این حال، زمانی که مذاب کامپوزیت به مدت ۳۰ و ۴۵ دقیقه نگهداشته شد، مساحت ذرات به ترتیب به ۰/۷۵ و ۰/۹۲ افزایش

برای فوق‌گدازی ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۵ دقیقه، اندازه ذرات به ۳۸۰/۶ میکرومتر رسید که کاهشی ۶۸٪ را نشان می‌دهد. سپس مجدداً اندازه ذرات برای مدت زمان نگهداری طولانی‌تر یعنی ۳۰ و ۴۵ دقیقه افزایش یافت و بترتیب به ۴۸۳ و ۶۶۶ میکرومتر رسید. همانطور که مشاهده می‌شود برای مدت زمان نگهداری ۱۵ دقیقه و در مقایسه با فوق‌گداز ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، فوق‌گداز ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین کاهش اندازه ذرات (۷۸٪) را نشان می‌دهد و اندازه ذرات به کمترین مقدار (۲۵۵/۵ میکرومتر) می‌رسد. روند مشابهی برای فوق‌گدازی ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در خصوص افزایش اندازه ذرات با افزایش زمان نگهداری مذاب مشاهده گردید. با افزایش

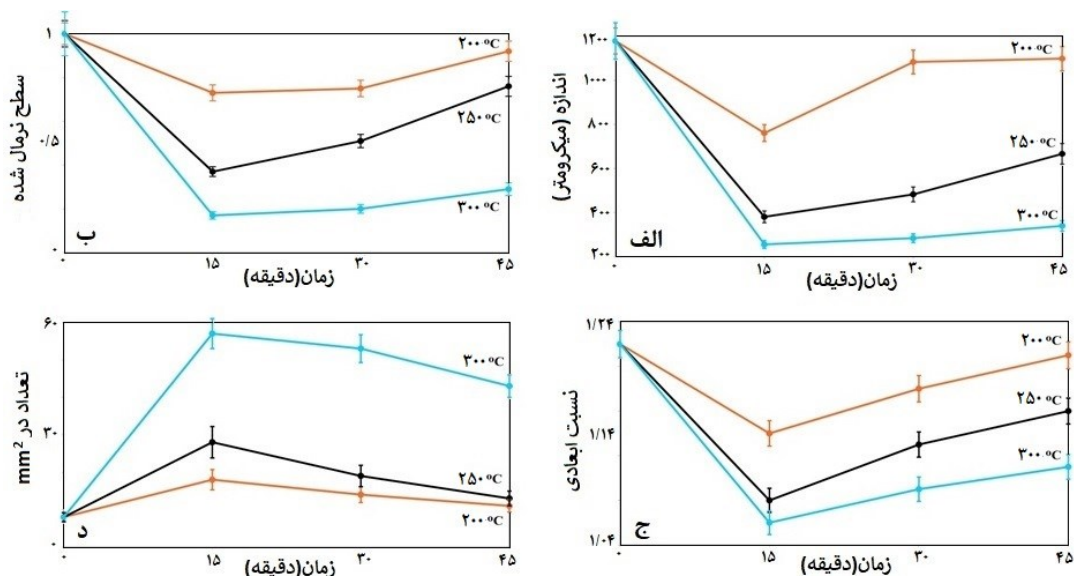
یافت. به همین ترتیب، در فوق‌گذاری ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۵ دقیقه نگهداری مذاب بیشترین کاهش در مساحت را در مقایسه با ۳۰ و ۴۵ دقیقه برای هر یک از فوق‌گذاها ایجاد کرد. کمترین مساحت ذرات برای فوق‌گذا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان نگهداری ۱۵ دقیقه به مقدار ۰/۱۷ بدست آمد. از مقایسه نتایج فوق‌گذاهای متفاوت در یک زمان نگهداری ثابت مشخص می‌شود که فوق‌گذاری بالاتر منجر به کاهش بیشتر سطح ذرات Mg_2Si_p می‌شود.

در خصوص نسبت ابعادی ذرات مشاهده می‌شود که با اعمال فوق‌گذاری به میزان ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و بدون در نظر گرفتن زمان نگهداری مذاب، نسبت ابعادی کاهش می‌یابد (شکل ۸-ج). با این حال از بین سه زمان نگهداری، ۱۵ دقیقه بیشترین کاهش نسبت ابعادی را نشان می‌دهد. این نتایج در راستای مشاهدات ریزساختاری است که ذرات به صورت چند وجهی و کوچکتر در ساختار مشاهده شدند (شکل ۴). نسبت ابعادی ذرات از ۱/۲۲ به ۱/۱۴ برای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گذاری، به ۱/۰۸ برای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گذاری و به ۱/۰۶ برای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گذاری برای ۱۵ دقیقه زمان نگهداری مذاب کاهش یافت. نسبت‌های ابعادی افزایش جزئی را برای مدت زمان نگهداری طولانی‌تر (۳۰ و ۴۵ دقیقه) برای هر فوق‌گذاری نشان داد. این افزایش مربوط به تغییر شکل ذرات و ایجاد شکل نامنظم، دندریتی و اسکلتی مانند در اثر افزایش زمان است.

۴-۳- بررسی منحنی‌های سرد شدن

از آنجائیکه عملیات فوق‌گذاری در دماهای بارریزی و زمانهای مختلف بر روی ساختار و بویژه فاز Mg_2Si_p تاثیرگذار بود، لذا می‌توان پیش‌بینی کرد که این عملیات مشخصه‌های انجمادی مربوط به این فازها را نیز تحت تاثیر قرار دهد. به همین منظور منحنی‌های سرد شدن مربوط به سه فوق‌گذاری و سه زمان متفاوت نگهداری مورد ارزیابی قرار گرفت. منحنی سرد شدن کامپوزیت‌ها در فوق‌گذاری ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های نگهداری ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه در شکل (۹) رسم شده است. لازم بذکر است که منحنی سرد شدن نمونه مرجع نیز جهت مقایسه آورده شده است. در نگاه کلی تغییر قابل توجهی در منحنی‌های سرد شدن دیده نمی‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر و با استفاده از رسم منحنی‌های مشتق اول و دوم، دمای تشکیل فازهای Mg_2Si_p ، Mg_2Si_E ، Al_5FeSi ، $Al_5Mg_8Si_6Cu_2$ و Al_2Cu (Θ) تعیین گردید که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

تجزیه و تحلیل بیشتر ذرات Mg_2Si_p نشان داد که کاهش اندازه ذرات با تشکیل بیشتر ذرات Mg_2Si_p همراه است. از شکل (۸-د) می‌توان دید که تعداد ذرات Mg_2Si_p در واحد سطح (mm^2) در تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع افزایش

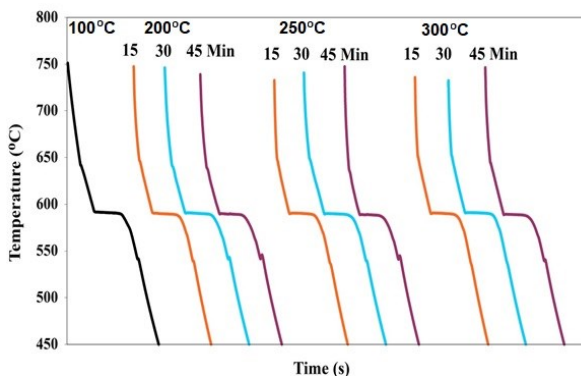


شکل ۸. نتایج تحلیل کمی ذرات Mg_2Si_p در فوق‌گذاری و زمان نگهداری مختلف: الف) اندازه، ب) مساحت، ج) نسبت ابعادی و د) تعداد ذرات در mm^2 .

دو فاز کمی کاهش یافت. اما در فوق‌گدازی ثابت، دمای تشکیل با افزایش بیشتر مدت زمان نگهداری مذاب از ۱۵ به ۴۵ دقیقه اندکی افزایش نشان داد. دمای تشکیل این فاز برای نمونه مرجع ۵۴۵/۵ درجه سانتی‌گراد بود که برای شرایط ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گدازی و مدت زمان ۱۵ دقیقه به ۵۴۱/۷ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. سپس برای مدت زمان نگهداری ۳۰ و ۴۵ دقیقه کمی افزایش یافت و بترتیب به ۵۴۲/۸ و ۵۴۴/۴ درجه سانتی‌گراد رسید. روند مشابهی برای سایر دماهای فوق‌گدازی مشاهده شد. در همین حال، در شرایط ثابت زمان نگهداری نتایج معکوسی بدست آمد. با افزایش فوق‌گدازی، دمای تشکیل فاز Q+θ کاهش یافت. برای مدت زمان نگهداری ۱۵ دقیقه، دمای تشکیل از ۵۴۵/۵ به ۵۴۴/۲ درجه سانتی‌گراد برای فوق‌گدازی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. با افزایش بیشتر فوق‌گدازی به ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، دمای تشکیل بترتیب به ۵۴۲/۸ و ۵۴۱/۷ درجه سانتی‌گراد تقلیل یافت.

۳-۵- خواص مکانیکی

شکل (۱۱) مقادیر متوسط اندازه‌گیری شده سختی کامپوزیت‌ها را در شرایط فوق‌گدازی و زمانهای نگهداری مختلف نشان می‌دهد. از اندازه‌گیری‌های بدست آمده مشخص شد که سختی متوسط نمونه مرجع ۶۸/۲ ویکرز بود. می‌توان دید که کامپوزیت‌هایی که تحت فوق‌گدازی قرار گرفته‌اند صرفنظر از دما و زمان، سختی بالاتری نسبت به نمونه مرجع دارند. در حالت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گدازی برای مدت زمان ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه، سختی بترتیب به ۷۴/۲، ۷۳/۲ و ۷۲ ویکرز افزایش یافت. همانطور که مشخص است با افزایش زمان نگهداری از سختی کامپوزیت‌ها کاسته شد. این روند کاهش با افزایش زمان برای فوق‌گدازی ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز مشاهده گردید. در فوق‌گدازی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ابتدا سختی ۷۷/۵ ویکرز برای مدت نگهداری ۱۵ دقیقه اندازه‌گیری گردید.



شکل ۹- منحنی سرد شدن کامپوزیت Al-20Mg₂Si-2Cu پس از اعمال فوق‌گدازی و زمان‌های نگهداری مختلف.

همانطور که از شکل (۱۰) مشاهده می‌شود عملیات فوق‌گدازی بر روی دمای تشکیل Mg₂Si_p تاثیرگذار است. با افزایش فوق‌گدازی به ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد دمای تشکیل فاز Mg₂Si_p افزایش یافته است. دمای تشکیل این فاز در نمونه مرجع ۶۴۷/۳ درجه سانتی‌گراد بود که به ۶۵۷/۸ سانتی‌گراد برای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گداز، به ۶۵۹ سانتی‌گراد برای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گداز و به ۶۶۴/۴ درجه سانتی‌گراد برای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گداز برای مدت نگهداری ۱۵ دقیقه افزایش یافت. افزایش دمای تشکیل Mg₂Si_p در نمونه‌های بهسازی شده با استرنسیم و سزیم نیز قبلاً گزارش شده است [۳۸، ۳۹] که نشان‌دهنده تسهیل در تشکیل این فاز است. روند مشابهی با افزایش زمان نگهداری مذاب به ۳۰ و ۴۵ دقیقه برای سه دمای مختلف به صورت جداگانه مشاهده شد. این نشان می‌دهد که افزایش فوق‌گدازی از ۲۰۰ به ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در حالیکه زمان نگهداری ثابت است، باعث افزایش بیشتر دمای تشکیل فاز Mg₂Si_p شده است. نتایج آنالیز حرارتی ارتباط مستقیمی بین بهسازی ذرات Mg₂Si_p و افزایش دمای تشکیل مربوطه را نشان می‌دهد. دلیل مشخصی برای افزایش دمای جوانه‌زنی در اثر افزایش فوق‌گداز گزارش نشده است. هرچند که افزایش دمای بارریزی می‌تواند موجب افزایش سرعت فرایند نفوذ و سهولت در جوانه‌زنی و در نتیجه افزایش دمای جوانه‌زنی شود [۴۰].

بررسی تاثیر همزمان دمای فوق‌گداز و زمان نگهداری بر روی دمای تشکیل فاز یوتکتیک Mg₂Si_E نشان داد که این پارامترها تاثیر جزئی بر روی مشخصه‌های انجمادی این فاز در کامپوزیت Al-20Mg₂Si-2Cu دارند. دمای تشکیل Mg₂Si_E در نمونه مرجع ۵۹۲/۷ درجه سانتی‌گراد است که به ۵۹۱/۷، ۵۹۰/۲، ۵۹۰/۳ درجه سانتی‌گراد بترتیب برای فوق‌گدازی ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۱۵ دقیقه تغییر کرد. دمای تشکیل فاز آهن β-Fe با افزایش فوق‌گدازی از ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. همچنین با نگهداری طولانی‌تر مذاب برای مدت ۳۰ و ۴۵ دقیقه برای هر یک از دماهای فوق‌گدازی، دمای تشکیل β-Fe کاهش پیدا کرد. از آنجائیکه با افزایش زمان فوق‌گدازی تبدیل آهن β-Fe سوزنی به α-Fe خط چینی صورت گرفت، ارتباطی بین تغییرات فاز غنی از آهن و دمای تشکیل آن می‌تواند وجود داشته باشد که نیاز به تحقیق و بررسی بیشتری دارد.

فازهای Q+θ از آخرین مذاب باقی مانده تشکیل می‌شوند. بررسی نشان داد که با افزایش فوق‌گدازی مذاب از ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، در یک زمان نگهداری ثابت، دمای تشکیل این

همچنین بر اساس رابطه گریفیث، $s_c = k_c/d^{1/2}$ ، در صورتیکه میزان تنش وارده بر آنها از یک مقدار بحرانی (s_c) بیشتر شود، شکست در ذرات رخ خواهد داد. در این رابطه K_C چقرمگی شکست و d قطر ذره است. کوچک بودن اندازه ذرات در کامپوزیت بهسازی شده، کمتر بودن وجوه نیز تمرکز تنش و سختی بالاتر، مقاومت در برابر شکسته شدن در حین سایش را افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان پیش‌بینی نمود که تاثیر مخرب حضور ذرات سخت شکسته و یا کنده شده Mg_2SiP در سطح سایش کمتر خواهد شد [۴۱] و در نتیجه خراش کمتری در سطح ایجاد خواهد شد و ضریب اصطکاک نیز کاهش خواهد یافت.

۴- نتیجه‌گیری

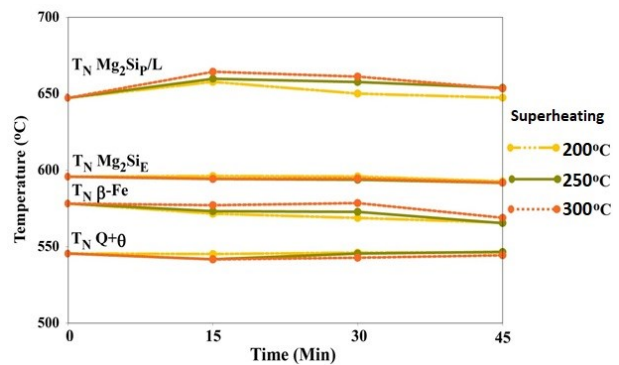
در این مطالعه تاثیر همزمان زمان‌های نگهداری مذاب برای مدت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه و فوق‌گدازی ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بر روی فازهای موجود و دمای تشکیل آنها و نیز سختی کامپوزیت $Al-20Mg_2Si-2Cu$ بررسی شد. نتایج بدست آمده به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱- عملیات فوق‌گدازی در مدت زمان‌های مختلف بیشترین تاثیر را بر روی فازهای Mg_2SiP اولیه و $\beta-Fe$ داشت. فاز Mg_2SiP از حالت درشت و دندردستی به چندضلعی ریز تبدیل گردید. همچنین فاز $\beta-Fe$ سوزنی به فاز $\alpha-Fe$ خط‌چینی تبدیل شد. در عین حال تغییر محسوسی در فازهای Mg_2SiE ، $Al_5Mg_8Si_6Cu_2$ و Al_2Cu در اثر اعمال فوق‌گدازی متفاوت و زمان‌های ذکر شده مشاهده نگردید.

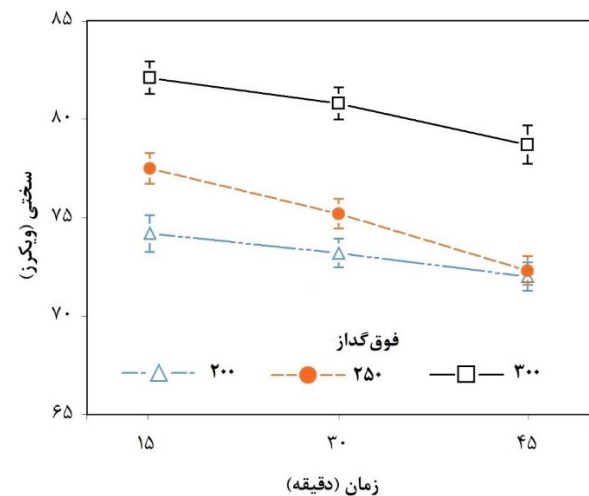
۲- با افزایش فوق‌گدازی، بازدهی بهسازی ذرات Mg_2SiP افزایش یافت. هرچند که با افزایش زمان این روند معکوس شد. بهترین نتیجه در شرایط ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گدازی و مدت زمان نگهداری ۱۵ دقیقه بدست آمد. اندازه ذرات بمیزان ۷۸٪ کاهش و تعداد ذرات بمیزان ۵۳۳٪ افزایش یافت. مساحت ذرات از ۱ به ۰/۱۷ و نسبت ابعادی از ۱/۲۲ به ۱/۰۶ کاهش یافت.

۳- دمای جوانه‌زنی Mg_2SiP بدون اعمال فوق‌گدازی ۶۴۷/۳ درجه سانتی‌گراد بود که پس از ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد فوق‌گدازی به مدت ۱۵ دقیقه بترتیب به ۶۵۷/۸، ۶۵۹ و ۶۶۴/۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. ارتباطی بین بهسازی ذرات Mg_2SiP و افزایش دمای جوانه‌زنی یافت شد.

۴- در تمامی شرایط فوق‌گدازی اعمال شده، سختی کامپوزیت‌ها بیشتر از نمونه بدون فوق‌گدازی بود و در حالت بهینه بمیزان ۲۰٪ افزایش یافت.



شکل ۱۰- تغییرات دمای تشکیل فازهای موجود در کامپوزیت $Al-20Mg_2Si-2Cu$ پس از اعمال فوق‌گدازی و زمان‌های نگهداری مختلف.



شکل ۱۱- تغییرات سختی کامپوزیت $Al-20Mg_2Si-2Cu$ پس از اعمال فوق‌گدازی در زمان‌های مختلف.

با افزایش زمان به ۳۰ و ۴۵ دقیقه، سختی بترتیب به ۷۵/۳ و ۷۲/۲ ویکرز کاهش یافت. در حالیکه کمترین مقدار سختی برای فوق‌گدازی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف بدست آمد، بیشترین سختی برای فوق‌گدازی ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری گردید. سختی کامپوزیت در شرایط فوق‌گدازی ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت نگهداری ۱۵ دقیقه ۸۲/۱ ویکرز بود که افزایش ۲۰٪ را نشان داد. با افزایش زمان به ۳۰ و ۴۵ دقیقه، سختی بترتیب به ۸۰/۸ و ۷۸/۷ ویکرز کاهش یافت. با توجه به ریزساختار مشاهده شده، کوچکتر شدن ذرات و افزایش تعداد ذرات موجب کاهش فاصله بین ذرات شده و در نتیجه سختی افزایش می‌یابد. از آنجائیکه بر اساس رابطه آرچارد^۳، مقاومت سایشی کامپوزیت به طور مستقیم با سختی آنها مرتبط است و اینکه نرخ سایش کامپوزیت تحت تاثیر نرخ سایش فاز مقاوم‌تر، یعنی ذرات Mg_2SiP است [۴۱] لذا می‌توان پیش‌بینی کرد در حالتی که سختی بالاتر است و ذرات Mg_2SiP ریزتر بوده و پراکندگی بهتری دارند مقاومت سایشی بیشتر خواهد بود.

مراجع

- [16] Du J., Iwai K., Modification of Primary Mg₂Si Crystals in Hypereutectic Mg-Si Alloy by Application Alternating Current, MATERIALS TRANSACTIONS, 50 (2009) 562–569.
- [17] میرک ع. ر.، قدسی م.، بررسی اثر دمایی ریختگی بر ریزساختار و خواص کششی گرم سوپرآلیاژ پایه آهن نیکل، مهندسی متالورژی، 21، 2018، 108–117.
- [18] Yin F. S., Sun X. F., Li J. G., Guan H. R., Hu Z. Q., Effects of melt treatment on the cast structure of M963 superalloy, Scripta Materialia, 48, 2003, 425–429.
- [19] Cui H., Tan Y., Bai R., Li Y., Zhao L., Zhuang X., Wang Y., Chen Z., Li P., You X., Cui C., Effect of melt superheat treatment on solidification behavior and microstructure of new Ni-Co based superalloy, Journal of Materials Research and Technology, 15, 2021, 4970–4980.
- [20] Pang S., Wu G. H., Liu W. C., Zhang L., Zhang Y., Conrad H., Ding W. J., Influence of pouring temperature on solidification behavior, microstructure and mechanical properties of sand-cast Mg-10Gd-3Y-0.4Zr alloy, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25, 2015, 363–374.
- [21] Wang Q., Geng H., Zhang S., Jiang H., Zuo M., Effects of Melt Thermal-Rate Treatment on Fe-Containing Phases in Hypereutectic Al-Si Alloy, Metallurgical and Materials Transactions A, 45, 2014, 1621–1630.
- [22] Ahmadi R., Marshall R. I., Effect of superheating on iron-rich plate-type compounds in aluminium-silicon alloys, International Journal of Cast Metals Research, 15, 2003.
- [23] Li P., Nikitin V. I., Kandalova E. G., Nikitin K. V., Effect of melt overheating, cooling and solidification rates on Al-16wt.%Si alloy structure, Materials Science and Engineering: A, 332, 2002, 371–374.
- [24] Dai H. S., Liu X. F., Refinement performance and mechanism of an Al-50Si alloy, Materials Characterization, 59, 2008, 1559–1563.
- [25] Qin Q. D., Zhao Y. G., Liang Y. H., Zhou W., Effects of melt superheating treatment on microstructure of Mg₂Si/Al-Si-Cu composite, Journal of Alloys and Compounds, 399, 2005, 106–109.
- [26] Shabestari S. G., Ashkvary S., Yavari F., Assessment of the Microstructure and Solidification Characteristics of Al-20%Mg₂Si Composite under Melt Superheating Treatment Using Thermal Analysis, IUST, 18, 2021, 1–9.
- [27] Zhang J., Fan Z., Wang Y. Q., Zhou B. L., Equilibrium pseudobinary Al - Mg₂Si phase diagram, Materials Science and Technology, 17, 2001.
- [28] Abouei V., Shabestari S. G., Saghafian H., Dry sliding wear behaviour of hypereutectic Al-Si piston alloys containing iron-rich intermetallics, Materials Characterization, 61, 2010, 1089–1096.
- [29] Narayanan L. A., Samuel F. H., Gruzleski J. E., Crystallization behavior of iron-containing intermetallic compounds in 319 aluminum alloy, Metallurgical and Materials Transactions A, 25, 1994.
- [30] Taylor J. A., Iron-Containing Intermetallic Phases in Al-Si Based Casting Alloys, Procedia Materials Science, 1, 2012, 19–33.
- [31] 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, 89, 2014, 112–123.
- [32] Kral M. V., Nakashima P. N. H., Mitchell D. R. G., Electron microscope studies of Al-Fe-Si intermetallics in an Al-11 Pct Si alloy, Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 37, 2006.
- [33] Rosefort M., Matthies C., Buck H., Koch H., Using SEM and EDX for a simple differentiation of α - and β -AlFeSi
- [1] Wu X. F., Wang Z. C., Wang K. Y., Zhao R. D., Wu F. F., Microstructural refinement and tensile properties enhancement of Al-10Mg₂Si cast alloys by copper addition, Journal of Alloys and Compounds, 2021, 163058.
- [2] 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, 733, 2018, 9–15.
- [3] Jiang W., Xu X., Zhao Y., Wang Z., Wu C., Pan D., Meng Z., Effect of the addition of Sr modifier in different conditions on microstructure and mechanical properties of T6 treated Al-Mg₂Si in-situ composite, Materials Science and Engineering: A, 721, 2018, 263–273.
- [4] Jin Y., Fang H., Wang S., Chen R., Su Y., Guo J., Effects of Eu modification and heat treatment on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Mg₂Si composites, Materials Science and Engineering: A, 831, 2022, 142227.
- [5] Zhao Y. G., Qin Q. D., Hang Y. H., Zhou W., Jiang Q. C., In-situ Mg₂Si/Al-Si-Cu composite modified by strontium, Journal of Materials Science, 40, 2005, 1831–1833.
- [6] Qin Q. D., Zhao Y. G., Liu C., Cong P. J., Zhou W., Strontium modification and formation of cubic primary Mg₂Si crystals in Mg₂Si/Al composite, Journal of Alloys and Compounds, 454, 2008, 142–146.
- [7] Tang P., Yu F., Teng X., Peng L., Wang K., Effect of beryllium addition and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of the 15%Mg₂Si/Al-8Si composite, Materials Characterization, 180 (2021) 111416.
- [8] R. Hadian, M. Emamy, N. Varahram, N. Nemati, The effect of Li on the tensile properties of cast Al-Mg₂Si metal matrix composite, Materials Science and Engineering A, 490, 2008, 250–257.
- [9] Nordin N. A., Farahany S., Abu Bakar T. A., Hamzah E., Ourdjini A., Microstructure development, phase reaction characteristics and mechanical properties of a commercial Al-20%Mg<inf>2</inf>Si-xCe in situ composite solidified at a slow cooling rate, Journal of Alloys and Compounds, 650, 2015.
- [10] Farahany S., Ghandvar H., Bozorg M., Nordin A., Ourdjini A., Hamzah E., Role of Sr on microstructure, mechanical properties, wear and corrosion behaviour of an Al-Mg₂Si-Cu in-situ composite, Materials Chemistry and Physics, 239, 2020, 121954.
- [11] Ghandvar H., Idris M. H., Ahmad N., Emamy M., Effect of gadolinium addition on microstructural evolution and solidification characteristics of Al-15%Mg₂Si in-situ composite, Materials Characterization, 135, 2018, 57–70.
- [12] Nasiri N., Emamy M., Malekan A., Norouzi M. H., Microstructure and tensile properties of cast Al-15%Mg₂Si composite: Effects of phosphorous addition and heat treatment, Materials Science and Engineering: A, 556 (2012) 446–453.
- [13] 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, 509, 2011, 9026–9033.
- [14] Yu H. C., Wang H. Y., Chen L., Zha M., Wang C., Li C., Jiang Q. C., Spheroidization of primary Mg₂Si in Al-20Mg₂Si-4.5Cu alloy modified with Ca and Sb during T6 heat treatment process, Materials Science and Engineering: A, 685, 2017, 31–38.
- [15] YANG C., LI Y., DANG B., LÜ H., LIU F., Effects of cooling rate on solution heat treatment of as-cast A356 alloy, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25, 2015, 3189–3196.

- [38] Farahany S., Nordin N. A., Ghandvar H., Cooling curve thermal analysis of Al-Mg₂Si-Cu-xSr composite, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019.
- [39] Nordin N. A., Farahany S., Abu Bakar T. A., Hamzah E., Ourdjini A., Microstructure development, phase reaction characteristics and mechanical properties of a commercial Al-20%Mg₂Si-xCe in situ composite solidified at a slow cooling rate, *Journal of Alloys and Compounds*, 650, 2015, 821-834.
- [40] اشکواری س.، شبستری س.، بررسی اثرات دمایی ذوب بر رفتار انجمادی کامپوزیت درجا Al-Mg₂Si به روش آنالیز حرارتی، پژوهشنامه ریخته‌گری، ۲۰۲۰، ۴، ۹-۱.
- [41] Sameezadeh M., Emamy M., Farhangi H., Effects of particulate reinforcement and heat treatment on the hardness and wear properties of AA 2024-MoSi₂ nanocomposites, *Materials & Design*, 32, 2011, 2157-2164.
- phases in wrought aluminum billets, in: *TMS Light Metals*, 2011.
- [34] 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*, 21, 2015382-390.
- [35] Xu J., Fan D., Zhang T., The effect of superheat on the nucleation undercooling of metallic melts, in: *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2021.
- [36] Jie Z., Zhang J., Huang T., Liu L., Fu H., The influence of melt superheating treatment on the cast structure and stress rupture property of IN718C superalloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 706, 2017.
- [37] Deev V., Prusov E., Ri E., Prihodko O., Smetanyuk S., Chen X., Konvalov S., Effect of melt overheating on structure and mechanical properties of Al-Mg-Si cast alloy, *Metals*, 11, 2021.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Simultaneous Effect of Melt Superheating and Holding Time on Structural Changes, Solidification Characteristics, and Hardness of Al-20Mg₂Si-2Cu Composite

Saeed Farahany^{1*}, Nur Azmah Nordin², Hamidreza Ghandvar³

1. Assistant Professor, Buin Zahra Higher Education Center of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2. Assistant Professor, Malaysia-Japan International Institute of Technology, Universiti Teknologi Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia.

3. Post-doctoral, Universiti Teknologi Malaysia, Johor, Malaysia.

* **Corresponding Author:** Tel: +98 (28) 33894, E-mail: s.farahani@bzeng.ikiu.ac.ir

Paper history:

Received: 30 December 2021

Accepted: 25 January 2022

Abstract

In this study, the effect of melt holding times for 15, 30, and 45 minutes at superheating temperatures of 200, 250, and 300 °C on the phase of Mg₂SiP, eutectic Mg₂SiE, Al₃FeSi, Al₅Mg₈Si₆Cu₂, Al₂Cu, nucleation temperature of these phases, and the hardness of Al-20Mg₂Si-2Cu composite were examined. Microstructural observations and quantitative analysis showed that the best modification was achieved at superheating of 300 °C and a holding time of 15 minutes. Compared with the reference sample with 100 °C superheating, the dendritic and coarse morphology of Mg₂SiP particles changed to the fine polyhedral. The average particle size decreased dramatically from 1179 to 255.5 μm. Particle area and aspect ratio decreased by 83% and 13%, respectively. The number of particles per unit area increased from 9 to 57. Superheating converted the needle β-Fe to the β α-Fe Chinese script, although no significant change in the features of the Mg₂SiE, Al₅Mg₈Si₆Cu₂, and Al₂Cu phases was observed. A good correlation was found between the nucleation temperature and the microstructural transformation of the Mg₂SiP phase. After implementing superheating of 300 °C for 15 minutes, the nucleation temperature of the Mg₂SiP phase increased from 647.3 to 664.4 °C. The superheating treated composites showed higher hardness than the reference specimen, regardless of temperature and time. The highest hardness was obtained with 82.1 Vickers, which could be attributed to increasing the number of particles and reducing the distance between particles.

Keywords:

Composite,
Mg₂Si,
Superheating,
Microstructure,
Thermal analysis.

Please cite this article using:

Saeed Farahany, Nur Azmah Nordin, Hamidreza Ghandvar, Simultaneous Effect of Melt Superheating and Holding Time on Structural Changes, Solidification Characteristics, and Hardness of Al-20Mg₂Si-2Cu Composite, in Persian, Founding Research Journal, 2021, 5(2) 93-106.

DOI: 10.22034/frj.2022.322231.1147

Journal homepage: www.foundingjournal.ir