

تولید چدن خاکستری مغزه گذاری شده با سیم آلومینیوم به روش فوم هدر رفته و بررسی ترکیبات بین فلزی ایجاد شده در اطراف مغزه

مسعود ارغیانی^{۱*}، مازیار آزادبه^۲، مهدی دیواندری^۳ و محمد ضرغامی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۳- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- مسئول گروه کارشناسی بخش فرآیندهای ریخته گری، شرکت ساپکو، تهران

*arghiani.masoud@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۸۹/۰۴/۰۱، تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۶/۰۴)

چکیده

ریخته گری لاست فوم از سال ۱۹۵۰ برای تولید قطعات مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش امکان مغزه گذاری در نمونه قبل از ریخته گری وجود دارد. همچنین این روش می تواند به عنوان روشی برای تولید کامپوزیت و بی متالها مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این امکان بررسی واکنش ها بین دو فلز مغزه گذاری شده و فلز مذاب در فصل مشترک نیز وجود دارد. در این تحقیق سیم آلومینیومی با قطر ۳ میلی متر در داخل مدل فومی جاگذاری و سپس چدن خاکستری با گوگرد پایین ریخته گری شد. نحوه ذوب شدن مغزه آلومینیوم، فازها و ترکیبات بین فلزی تشکیل شده از آهن و آلومینیوم و همچنین اثر آلومینیوم بر گرافیت در فصل مشترک توسط میکروسکوپ الکترونی بررسی شد. نتایج تشکیل فازهای Fe_3AlC_x و $FeAl$ ، $FeAl_2$ ، $FeAl_3$ را نشان داد.

واژه های کلیدی:

ریخته گری لاست فوم، چدن خاکستری، مغزه آلومینیوم، ریزساختار، ترکیبات بین فلزی.

۱- مقدمه

روش لاست فوم در طی سال های اخیر به دلیل مزایایی چون امکان تولید قطعات پیچیده، عدم وجود خط جدایش، کاهش نیروی انسانی در کارخانه های تولید قطعات، مورد توجه بسیار قرار گرفته است [۳ و ۴]. موضوعاتی نظیر نوع پوشش، کاهش نواقص قطعه تولید شده با این روش، مواردی هستند که همواره مورد توجه محققین بوده اند [۵].

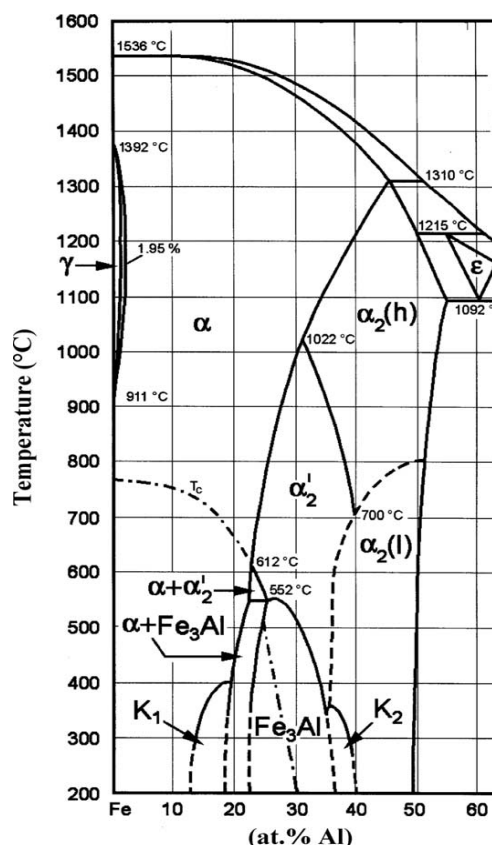
روش ریخته گری لاست فوم به عنوان روش قابل اعتماد در ریخته گری مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. در این روش مدل فومی به شکل مورد نظر طراحی و ساخته می شود و سپس در داخل ماسه قرار داده می شود. مدل فومی پس از ریختن مذاب بخار شده و از بین می رود و مذاب جای آن را پر می کند [۲].

پیشرفت‌هایی در کاهش این قبیل مشکلات انجام داده‌اند. افزودن کربن به این آلیاژها قابلیت ماشین کاری آنها را افزایش می‌دهد [۱۱]. افزایش استحکام تسلیم در دمای اتاق با استحکام‌دهی محلول جامد توسط اتم‌های بین‌نشین کربن انجام گرفته است که باعث ایجاد رسوبات $Fe_3AlC_{0.5}$ شد [۱۲].

چدن‌های خاکستری آلیاژهای مهمی در صنعت به شمار می‌روند. هزینه‌ی پایین، قابلیت ریخته‌گری خوب و خواص مکانیکی مناسب از جمله مزایای این چدن‌ها محسوب می‌شوند [۱۳، ۱۴ و ۱۵]. شکل، اندازه و نحوه توزیع گرافیت، عواملی هستند که بر روی خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارند [۱۵].

دیاگرام تعادلی آهن-آلومینیوم در شکل (۱) نشان داده شده است. در محدوده ترکیبی صفر تا ۵۴ درصد اتمی آلومینیوم، چهار فاز جامد وجود دارد. حلالیت آلومینیوم در آهن γ با ساختار fcc تا حدود ۱/۳ درصد است. در مقابل در ساختار بی‌نظم آهن α (A2)، با ساختار bcc، آلومینیوم بسته به دما تا حدود ۴۵ درصد اتمی می‌تواند حل شود. بین صفر تا ۵۴ درصد آلومینیوم، دو ترکیب منظم وجود دارد. ساختار منظم DO3 که در Fe_3Al وجود دارد و در محدوده ترکیبی ۲۷ درصد اتمی آلومینیوم و در زیر دمای ۵۵۲ درجه سانتی‌گراد پایدار است و ساختار منظم B2، که در $FeAl$ (α_2) بین ۲۳ تا ۵۴ درصد آلومینیوم و بسته به دما پایدار است. علاوه بر این خطوطی نیز برای مشخص کردن دمای کوری روی دیاگرام مشاهده می‌شود. همچنین در منطقه‌ای که ساختار منظم $FeAl$ وجود دارد ناحیه‌ای تحت عنوان حالت K وجود دارد که فازها در این ناحیه دارای خواص مکانیکی متفاوتی نسبت به یکدیگر می‌باشند، هر چند تاکنون مکانیزم این اختلاف خواص به خوبی توسط محققین درک نشده است [۱۶].

فازهای موجود آهن-آلومینیوم-کربن بر اساس درصد اتمی آلومینیوم مشخص شده‌اند [۱۷]. هدف از این تحقیق بررسی نحوه ذوب شدن سیم آلومینیوم مغزه‌گذاری شده، اثر آن بر روی ریزساختار و همچنین ترکیبات بین فلزی از دو عنصر آهن-آلومینیوم است.



شکل (۱): قسمتی از دیاگرام آهن-آلومینیوم در محدوده غنی از آهن [۱۶].

یکی از مزایای این روش امکان مغزه‌گذاری در داخل مدل قبل از ریختن مذاب است. روش لاست فوم امکان مطالعه فصل مشترک و ریزساختار بین فلز مغزه‌گذاری شده و فلز مذاب را فراهم می‌سازد [۵، ۶، ۷ و ۸].

علاقه به گسترش و تولید ترکیبات بین فلزی که در دماهای بالا کاربرد دارند در طی سال‌های اخیر افزایش چشمگیر داشته است. آلیاژهای بین فلزی از آهن و آلومینیوم به ویژه $FeAl$ و Fe_3Al برای این منظور گسترش یافته‌اند. از جمله مزایای این آلیاژها می‌توان به مقاومت بالا در محیط‌های سولفیدی، اکسیدی، دانسیته نسبتاً پایین (6700 تا 5400 kg/m^3) که حدود ۳۰ درصد سبک‌تر از دیگر مواد تجاری مورد استفاده در دمای بالا هستند و هزینه پایین اشاره نمود [۹ و ۱۰]. هر چند داکتیلیته و چقرمگی پایین این آلیاژها از مشکلات عمده به شمار می‌رود ولی محققین

جدول (۱): ترکیب شیمیایی شمش چدن خاکستری ریخته شده.

Fe	C	Si	Mn	P	S
Rem.	۳/۷۰	۰/۳۴۲	۰/۰۲۷	۰/۰۴۷	۰/۰۲

پلی استیرن با چگالی ۰/۰۲ گرم بر سانتی متر مکعب تهیه گردید. یک نمونه بدون سیم هم به عنوان نمونه شاهد ریخته شد. ارتفاع هر مقطع دایره‌ای ۴۰ میلی‌متر و قطر آنها به ترتیب از بالا ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مدل به گونه‌ای طراحی شد که حالت‌های مختلف ذوب شدن و انحلال سیم آلومینیوم قابل بررسی باشد. عملیات قالب‌گیری جهت داشتن سرعت عمل مطلوب و حذف عوامل مشکل‌ساز با استفاده از چسب سیلیکات سدیم و دمش گاز CO₂ انجام شد.

برای تهیه ذوب از چدن خاکستری با گوگرد پایین و کوره زمینی استفاده گردید. ترکیب شیمیایی شمش مورد نظر در جدول (۱) ارائه شده است. پس از تهیه مذاب، عملیات جوانه‌زنی و سرباره‌گیری صورت گرفت و بارریزی در درجه حرارت ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نمونه پس از خروج از قالب به هشت قسمت مساوی در طول ارتفاع بریده و به ترتیب از بالا شماره‌گذاری شدند و پس از آماده‌سازی و پولیش ریزساختار نمونه‌های ۱، ۴ و ۸ توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند.

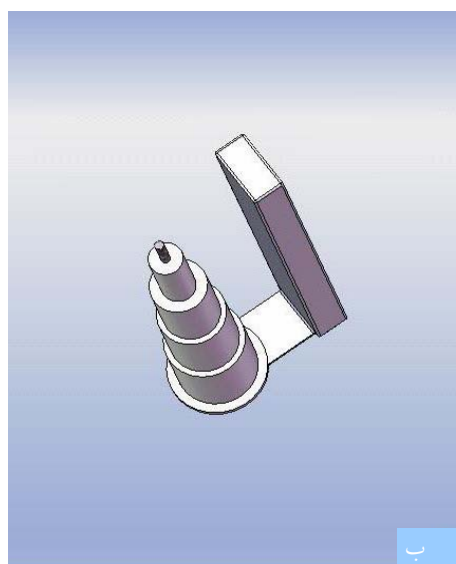
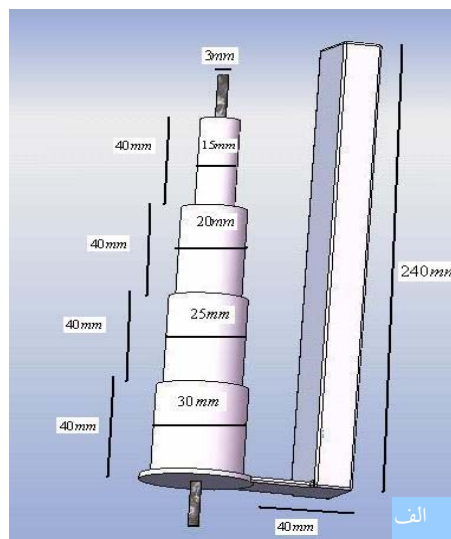
۳- نتایج و بحث

تصویر ریزساختار نمونه بدون مغزه آلومینیومی در شکل (۳) نشان داده شده است.

این شکل نشان‌دهنده گرافیت ورقه‌ای نوع A است. این نوع گرافیت در چدن‌های خاکستری هیپووتکتیک و یوتکتیک که با نرخ معمولی سرد شده‌اند، مشاهده می‌شود. کربن معادل طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$CE = \%C + 0.33 (\%Si + \%P) \quad (1)$$

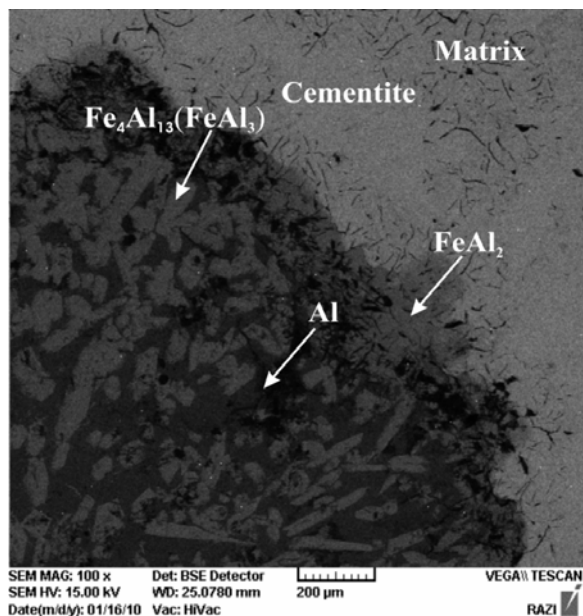
در این تحقیق کربن معادل ۳/۸۳ بود که در محدوده چدن هیپووتکتیک است.



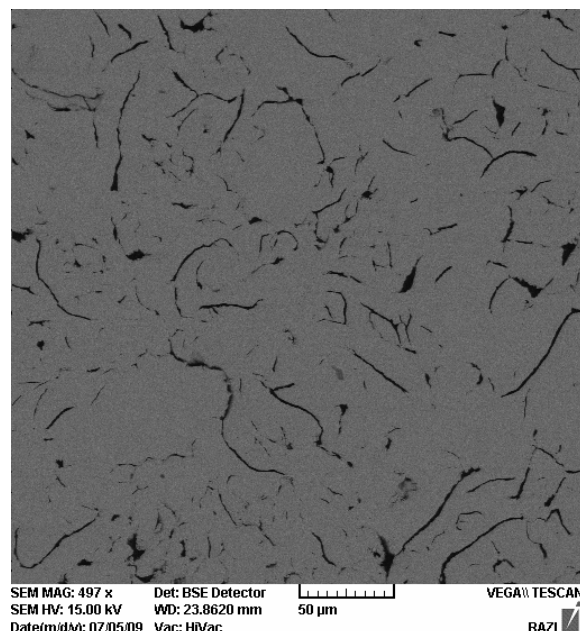
شکل (۲): نحوه جاگذاری مغزه آلومینیوم در مدل فومی، (الف) با جزئیات، (ب) نمای کلی.

۲- مواد و روش تحقیق

سیم آلومینیومی مورد استفاده در این آزمایش با قطر ۳ میلی‌متر تهیه و به روش نشان داده شده در شکل (۲) در داخل فوم مغزه‌گذاری شد. لازم به یاد آوری است که سیم پس از شستشو و چربی‌زدایی سطحی، به وسیله الکل و خشک شدن در جریان هوا، به طول ۲۰ سانتی‌متر بریده شده و سپس مورد استفاده قرار گرفت. مدل‌های مورد نیاز از جنس فوم



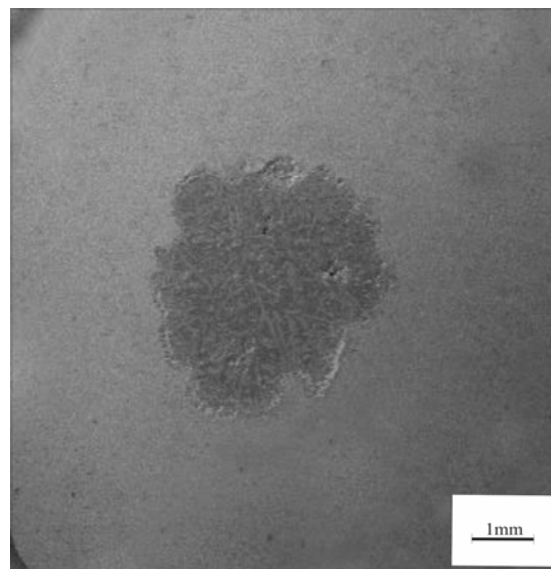
شکل (۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از نمونه ۱ که فازها در آن مشخص شده‌اند.



شکل (۳): تصویر ریزساختار نمونه بدون مغزه آلومینیوم (نمونه شاهد).

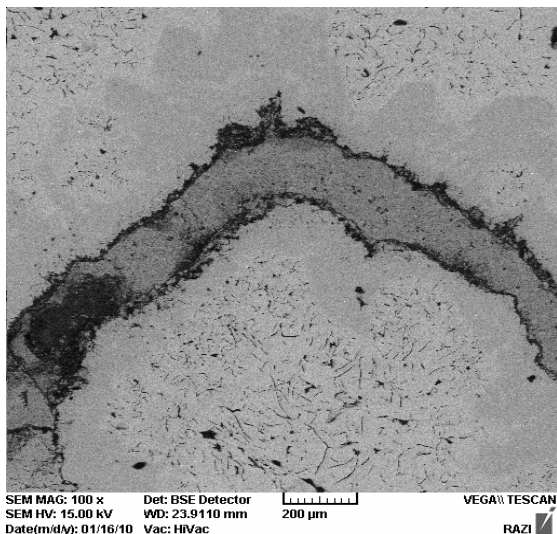
در شکل (۵) منطقه واکنش بین مغزه آلومینیومی و چدن با بزرگنمایی بالا نشان داده شده است. در این شکل در منطقه سمت چپ پائین مغزه آلومینیومی، در سمت راست بالا زمینه چدنی و در منطقه ما بین آنها منطقه تحت تأثیر توسط سیم (که با علامت اختصاری WAZ، نامگذاری شده) مشاهده می‌شود. همچنین مناطق فازی مختلف به وجود آمده در اثر واکنش مغزه آلومینیومی با زمینه در مقطع نمونه ۱ (مقطع نازک) روی شکل مشخص شده‌اند. در شکل (۶) سه ناحیه مذکور در بالا به طور شماتیک نشان داده شده که عبارتند از مناطقی که نزدیک و تقریباً چسبیده به سیم آلومینیومی هستند و مقداری گرافیت در آنجا قابل مشاهده است، منطقه بعدی که عاری از گرافیت است و در آخر زمینه چدنی که گرافیت نوع A در آن وجود دارد.

شکل‌های (۷) تا (۱۱) نشان‌دهنده ریزساختار نمونه ۴ هستند. شکل (۷) شمای کلی از سطح مقطع ۴ را نشان می‌دهد، همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود سیم آلومینیوم به شکل حلقه مانند در آمده است. قسمت بالایی حلقه در شکل (۸) با

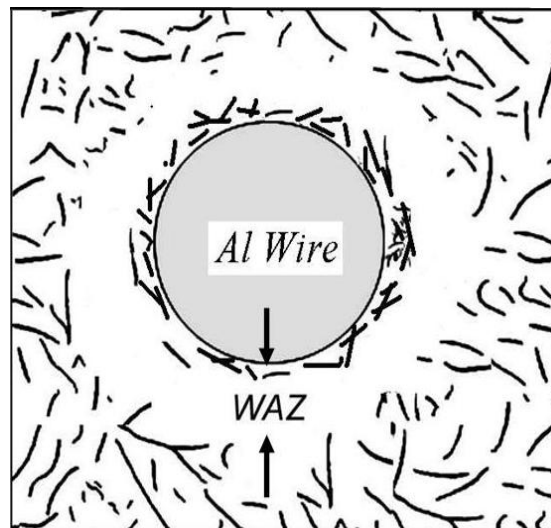


شکل (۴): تصویر ماکروسکوپی از نمونه ۱.

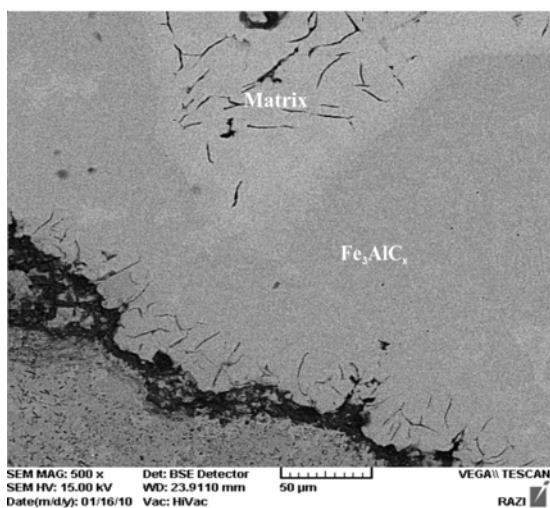
نمونه مغزه آلومینیوم به مقدار بسیار ناچیزی ذوب شده است. شکل‌های (۴) و (۵) نشان‌دهنده ریزساختار نمونه ۱ است. در این شکل (۴) تصویر کلی از سیم آلومینیوم در چدن را نشان می‌دهد، انحلال سیم آلومینیوم در این مقطع نازک ناچیز بوده و تقریباً بدون تغییر باقی مانده است.



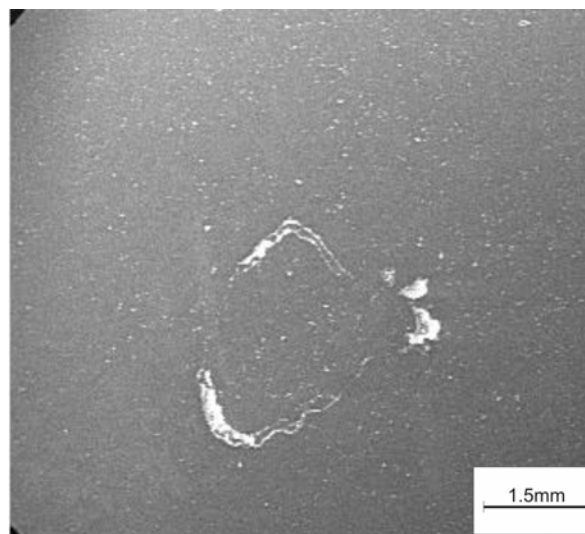
شکل (۸): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه ۴.



شکل (۶): منطقه تحت تأثیر توسط سیم آلومینیوم (WAZ).



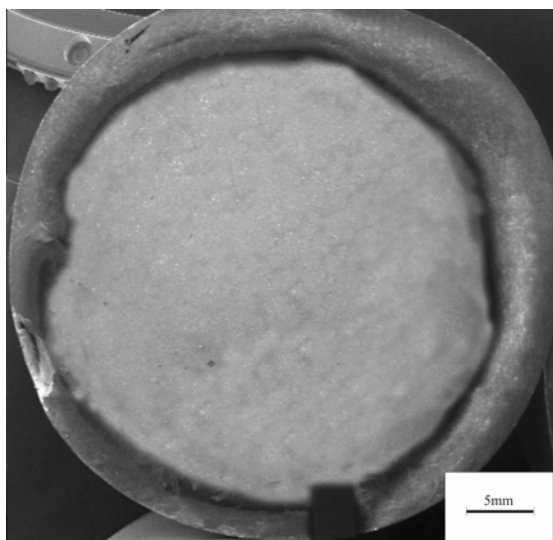
شکل (۹): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه ۴ که در آن ترکیب بین فازی در اطراف مغزه ذوب شده قابل مشاهده است.



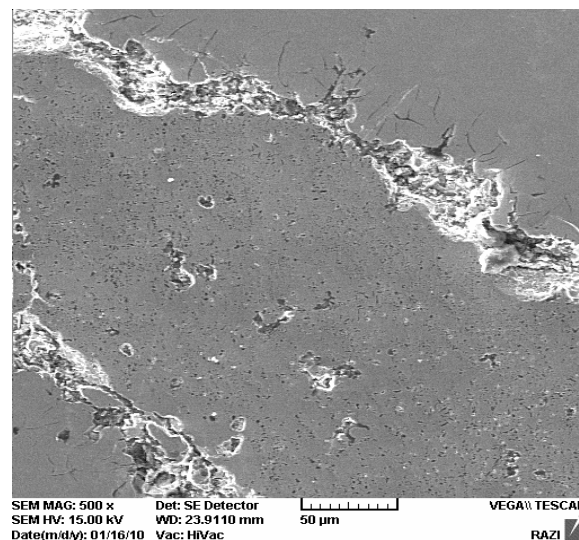
شکل (۷): تصویر ماکروسکوپی از نمونه ۴.

طور کامل ذوب نشده را نشان می‌دهد، ضخامت لایه غنی از آلومینیوم در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر تخمین زده می‌شود. در شکل (۱۱) قسمت داخلی حلقه که در شکل قبلی نشان داده شده بود با بزرگنمایی بالاتر نشان داده شده است. ترکیبات بین فلزی مختلف با توجه به اختلاف رنگ‌ها قابل تشخیص هستند. این فازها که توسط آزمایشات EDS مشخص شده‌اند، روی شکل نامگذاری شدند. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده

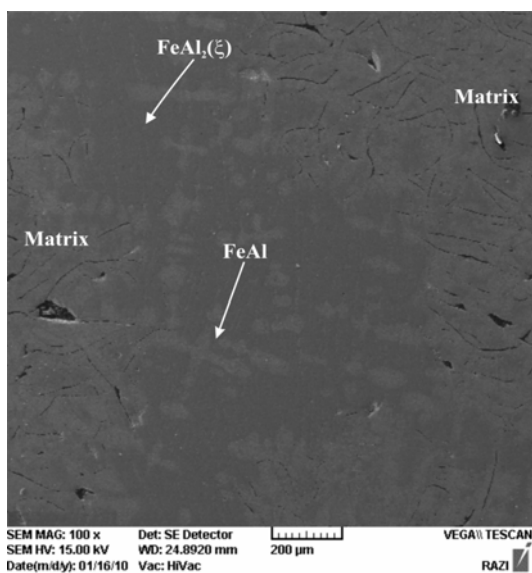
بزرگنمایی بالاتر نشان داده شده است. در این شکل فصل مشترک آلومینیوم ذوب شده با زمینه قابل مشاهده است. در شکل (۹) جزئیات فصل مشترک با بزرگنمایی بالاتر مشاهده می‌گردد و فازهای به وجود آمده که با بررسی‌های EDS تعیین شده‌اند، مشخص شده است. گرافیت‌های ریزی در منطقه‌ای که سیم آلومینیوم ذوب شده قابل تشخیص است. در شکل (۱۰) تصویر میکروسکوپ الکترونی ثانویه قسمتی از آلومینیوم که به



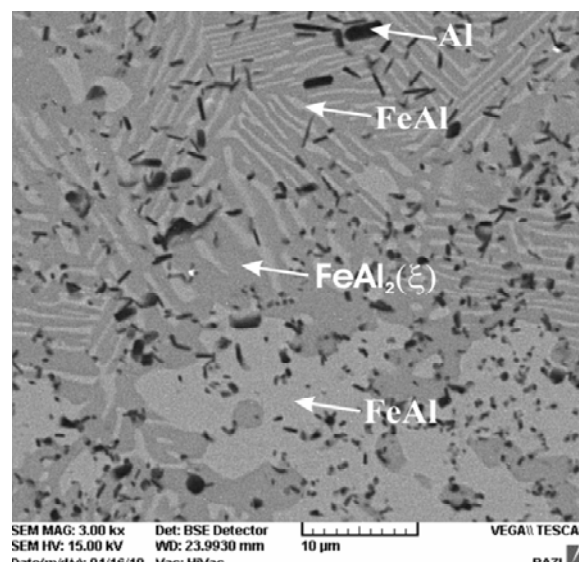
شکل (۱۲): تصویر ماکروسکوپی از نمونه ۸



شکل (۱۰): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از محل ذوب شدن مغزه آلومینیوم نمونه ۴ با بزرگنمایی بالاتر.



شکل (۱۳): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مرکز نمونه ۸ که فازها در آن مشخص شده‌اند.



شکل (۱۱): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از داخل منطقه نشان داده شده در شکل (۱۰) با بزرگنمایی بالاتر که در آن فازها مشخص شده‌اند.

ظاهراً اثری از سیم در این شکل مشاهده نمی‌شود. در شکل (۱۳) بزرگنمایی بیشتر شده و ترکیبات بین فلزی و زمینه در قسمت مرکزی نمونه مشخص شده‌اند. در این مقطع سیم به طور کامل ذوب شده است و از لحاظ ماکروسکوپی قابل تفکیک با زمینه نیست. ترکیب فازهای تشکیل شده در نمونه‌های ۱، ۴ و ۸ که در شکل‌های (۵)، (۹)، (۱۱) و (۱۳) نشان داده شده با تعیین

می‌گردد، سیم آلومینیوم در این نمونه نیز به طور کامل ذوب نشده است، اما در مقایسه با نمونه ۱ میزان ذوب شدن سیم بیشتر بود.

تصاویر نمونه ۸ در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده‌اند. شکل (۱۲) تصویر ماکروسکوپی از این نمونه را نشان می‌دهد،

در حالتی که سیم به مقدار ناچیزی ذوب شده بود، مشاهده شد که مقداری آهن در بخش مرکزی این ناحیه وجود دارد (شکل ۵). این موضوع نشان می‌دهد که ذوب شدن سیم نه فقط از کناره‌های سیم، بلکه از قسمت مرکزی نیز انجام گرفته است. ولی مذاب چدن به دلیل نداشتن زمان و گرمای لازم قادر به ذوب سیم آلومینیوم به میزان زیاد نبوده است. این نمونه دارای کوچکترین سطح مقطع است و آخرین سطح مقطعی است که مذاب به آن می‌رسد، بنابراین مذاب رسیده به این قسمت کمترین دما را داراست.

طبق تحقیقات صورت گرفته توسط محققین، بخش مرکزی یک قطعه ریخته شده بیشترین گرما را دارد [۱۸]. زیرا حرارت مذاب روی قسمت مرکزی متمرکز می‌شود، در نتیجه در این تحقیق سیم آلومینیوم در معرض بالاترین دما در قالب قرار داشته است. این موضوع را می‌توان اینگونه توضیح داد که اگر کل گرمای مذاب Q_T فرض شود در این صورت:

$$Q_t = Q_f + Q_m + Q_w \quad (2)$$

که Q_f حرارت لازم برای تبخیر فوم پلی‌استیرن، Q_m گرمایی که توسط دیواره قالب منتقل شده است، Q_w گرمایی است که بر روی سیم آلومینیوم متمرکز شده است، Q_w همان گرمایی است که در عمل باعث ذوب سیم آلومینیوم به صورت جزئی یا کامل شد. این گرما اول باید قادر باشد تا به شکاف هوایی بین مذاب و سیم غلبه کند و سپس بتواند سیم را ذوب کند. از این رو می‌توان Q_w را به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$Q_w = Q_a + Q_l \quad (3)$$

که در این رابطه، Q_a گرمای لازم برای غلبه بر شکاف هوایی ایجاد شده بین مذاب و سیم آلومینیوم و Q_l گرمای لازم برای ذوب سیم آلومینیوم است. در این نمونه به نظر می‌رسد که مقدار گرمای لازم برای ذوب آلومینیوم کافی نبوده است (Q_l)، در نتیجه سیم آلومینیوم به مقدار بسیار ناچیزی ذوب شده است (شکل‌های ۴ و ۵).

وجود آهن در بخش مرکزی این نمونه و تشکیل فاز Fe_4Al_{13} ($FeAl_3$) در این بخش بیانگر این موضوع است که سیم

جدول (۲): ترکیب شیمیایی فازها بر حسب درصد اتمی آلومینیوم که در شکل (۵) مشخص شده‌اند.

فاز	ترکیب بر حسب درصد اتمی آلومینیوم
$Fe_4Al_{13}(FeAl_3)$	۷۵
$FeAl_2$	۶۵

جدول (۳): ترکیب شیمیایی فاز مشخص شده در شکل (۹) بر حسب درصد اتمی آلومینیوم.

فاز	ترکیب بر حسب درصد اتمی آلومینیوم
Fe_3AlC_x	۲۱

جدول (۴): ترکیب شیمیایی فازها بر حسب درصد اتمی آلومینیوم که در شکل (۱۱) مشخص شده‌اند.

فاز	ترکیب بر حسب درصد اتمی آلومینیوم
$FeAl$	۵۲
$FeAl_2$	۶۶

جدول (۵): ترکیب شیمیایی فازها بر حسب درصد اتمی آلومینیوم که در شکل (۱۳) مشخص شده‌اند.

فاز	ترکیب بر حسب درصد اتمی آلومینیوم
$FeAl$	۴۸
$FeAl_2$	۶۷

مقدار آلومینیوم با آزمایشات EDS و مقایسه آن با اطلاعات کریستالوگرافی و ترکیب‌های شیمیایی مختلف فازهای سیستم Fe-Al-C [۱۷]، تعیین و نتایج آن به ترتیب در جداول (۲)، (۳)، (۴) و (۵) بر حسب درصد اتمی آلومینیوم آورده شده است. با نتایج ارائه شده تا این قسمت، نمونه‌ها را در مجموع می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

۱- نمونه‌هایی که در آنها، آلومینیوم به صورت جزئی ذوب شده است.

۲- نمونه‌ای که ظاهراً سیم آلومینیوم کامل ذوب شد.

بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد. همانند نمونه قبلی سه ناحیه مجزا از هم قابل مشاهده است. این نواحی ظاهراً مشابه نواحی نمونه قبلی هستند. ناحیه اول منطقه‌ای با مقدار آلومینیوم بالا، ناحیه بعدی منطقه WAZ و ناحیه سوم زمینه چدنی است. البته در بین دو نمونه در مناطقی که مقدار آلومینیوم بالا بود فازهای متفاوتی تشکیل شده‌اند که این اختلاف فازهای ایجاد شده به علت مقادیر مختلف آلومینیوم در آنها است. این فازها در تصاویر مشخص شده‌اند. منطقه عاری از گرافیت در این نمونه را می‌توان به دلیل تشکیل فاز Fe_3AlC_x دانست که اتم‌های کربن به جای تشکیل گرافیت، ترکیباتی با آهن و آلومینیوم تشکیل داده‌اند و این ترکیبات پایدارتر از گرافیت در آن منطقه هستند. تصاویر نمونه ۸ در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده‌اند. در شکل (۱۲) ظاهراً سیم آلومینیوم به طور کامل ذوب شده است. شکل (۱۳) تصویری با بزرگنمایی بالاتر را نشان می‌دهد، در این شکل دو منطقه مشاهده می‌شود، منطقه‌ای که میزان آلومینیوم در آنها نزدیک ترکیب $FeAl$ و $FeAl_2$ است و منطقه‌ای زمینه که در آن گرافیت لایه‌ای نوع A وجود دارد. می‌توان اینگونه فرض کرد که مذاب در این منطقه سیم آلومینیوم را ذوب کرده است و سپس در این سطح مقطع در نواحی مختلف پخش شده است و بخشی از آلومینیوم ذوب شده توسط جریان به قسمت‌های بالایی قطعه منتقل شده‌اند. این منطقه در معرض بیشترین جریان جابجایی مذاب قرار داشت.

۴- نتیجه‌گیری

۱- در نمونه شاهد بدون سیم آلومینیوم گرافیت لایه‌ای نوع A وجود داشت اما در نمونه‌هایی که سیم آلومینیوم مغزه‌گذاری شده بود، مناطق عاری از گرافیت مشاهده شد که دلیل تشکیل چنین منطقه‌ای در نمونه ۱ مربوط به عملکرد سیم آلومینیوم به عنوان عاملی که فوق تبرید را افزایش داده و در نتیجه کربن به شکل سمیتیت تشکیل شد و در نمونه ۴ به علت تشکیل فاز Fe_3AlC_x است که اتم‌های کربن به شکل ترکیب با اتم‌های آهن و آلومینیوم درآمدند.

آلومینیوم فقط از کناره‌ها ذوب نشده است بلکه احتمالاً توسط مذابی که از قسمت پایین با سیم به طور مستقیم برخورد داشته ذوب شده است، این فرض از طریق مقایسه با نمونه بعدی تأیید می‌شود (شکل‌های ۷ تا ۱۱).

این موضوع نشان‌دهنده وجود جریان جابجایی در مذاب است. در نمونه اول، میزان جابجایی مذاب کم بود، در نتیجه سیم آلومینیوم به میزان زیادی ذوب و نفوذ نکرد. در شکل‌های (۵) و (۹) منطقه WAZ و زمینه چدنی قابل مشاهده است. در شکل (۵)، گرافیت‌هایی در نزدیکی سیم مشاهده می‌شوند که اندازه آنها کوچک‌تر از اندازه گرافیت‌های زمینه است، این موضوع نشان می‌دهد که آلومینیوم در این محدوده ترکیبی باعث تشکیل گرافیت شده است. بخش دیگر منطقه WAZ، در شکل (۵) مربوط به منطقه عاری از گرافیت است. آنالیز EDS، نشان داد که مقدار آلومینیوم در این منطقه در حدود ۱٪ اتمی است که مقدار بسیار ناچیزی محسوب می‌شود و عملاً می‌توان آن را نادیده گرفت. در این ناحیه کربن به جای گرافیت، به صورت ترکیبی و به شکل سمیتیت (Fe_3C) شکل گرفته است. تشکیل سمیتیت در این ناحیه را می‌توان به علت وجود سیم آلومینیوم دانست که باعث افزایش نرخ تبرید شده و کربن فرصت لازم برای نفوذ و تشکیل گرافیت را نداشته است. شکل (۷)، وجود جریان جابجایی در مذاب پیشرونده در حین پر شدن قالب را تأیید می‌کند. همانطور که شکل‌های (۷) و (۸) نشان می‌دهند سیم آلومینیوم به شکل یک حلقه در آمده است. همچنین این شکل‌ها نشان‌دهنده این موضوع هستند که سیم آلومینیوم هم از کناره‌ها و هم از قسمت مرکزی ذوب شده و سپس به وسیله جریان جابجایی که در مذاب وجود داشت در نمونه پخش شده است. این فرض که قسمتی از آلومینیوم ذوب شده توسط جریان مذاب از قسمت‌های پایین نمونه به بالای آن جابجا شده است منطقی به نظر می‌رسد. زیرا فاصله‌گازی ایجاد شده در حین بارریزی بین مذاب چدن و مدل فومی باعث می‌شود که سیم آلومینیوم در این فاصله‌گذاری ذوب شده و امکان پخش شدن و مخلوط شدن با مذاب را پیدا کند. شکل (۹) تصویر قبلی را با

- [8] M. Divandari and A. R. Golpayegani, "Study of Al/Cu Rich Phase Formed in A356 Alloy by Inserting Cu Wire in Pattern in LFC Process", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 3279-3285, 2009.
- [9] T. Laha, A. Tewari, R. Balasubramaniam, M. N. Mungole and R. G. Baligidad, "Microstructural Evolution in Iron Aluminide Fe-28Al-2C after High Temperature Hydrogen Treatment", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 34 A, pp. 1789-1798, 2004.
- [10] C. T. Liu and K. S. Kumar, *J. Met.* Vol. 45, pp. 38-44, 1993.
- [11] N. Parvanthavarthini, U. Prakash and R. K. Dayal, "Effect of Carbon Addition on Hydrogen Permeation in Fe₃Al Based Intermetallic Alloy", *Intermetallics*, Vol. 10, pp. 329, 2002.
- [12] D. Das, R. Balasubramaniam and M. N. Mungole, "Hot Corrosion of Carbon-Alloyed Fe₃Al Based Iron Aluminides", *Material Science and Engineering*, Vol. 338, pp. 24-32, 2002.
- [13] R. Elliott, *Cast Iron Technology*, 1st ed., London, Butterworth, 1988.
- [14] ASM Metals Handbook, "Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys", Ohio, ASM International, Vol. 1, 1992.
- [15] WF. Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys", 2nd ed., New York, McGraw-Hill, 1993.
- [16] M. Palm, "Concepts Derived from Phase Diagram Studied for the Strengthening of Fe-Al Based Alloys", *Intermetallics*, Vol. 13, pp. 1286-1296, 2005.
- [17] G. Ghosh, "Aluminum-Carbon-Iron", Springer, Landolt-Bornstein, Vol. 11 A, pp. 123-138, 2008.
- [18] J. Campell, "Casting", Oxford, Butterworth-Heinemann, 2003.

۲- وجود آلومینیوم اثر جالب دیگری داشت، در مناطقی که میزان آلومینیوم بالا بود، گرافیت تشکیل شد. این موضوع به علت کاهش حلالیت کربن در آهن است. زیرا آلومینیوم حلالیت کربن را در آهن کاهش می دهد و در نتیجه اتم های کربن تشکیل گرافیت داده اند.

۳- نحوه ذوب شدن آلومینیوم در نمونه های مختلف نشان دهنده وجود جریان جابجایی در مذاب است.

۴- در حالت های مختلفی که آلومینیوم ذوب شد، ترکیبات بین فلزی های FeAl, FeAl₂, FeAl₃ و Fe₃AlC_x تشکیل شده است.

۵- مراجع

- [1] M. Abdelrahman, J. Pradeep, R. Dinwiddie, G. Walford and F. Vondra, "Monitoring Metal-Fill in a Lost Foam Casting. *ISA Transactions*", Vol. 45, pp. 459-47, 2006.
- [2] X. J. Liu, S. H. Bhavanani and R. A. Qverfelt, "Simulation of EPS Foam Decomposition in the Lost Foam Casting Process", *Materials Processing Technology*, Vol. 182, pp. 334-342, 2007.
- [3] Monroe RM. *Expendable Pattern Casting*. 1st ed. AFS Inc; 1992.
- [4] ASM Metals Handbook, *Casting*. Ohio, ASM International, Vol. 15, 1992.
- [5] M. M. Hejazi, M. Divandari and E. Taghaddos, "Effect of Copper Insert on the Microstructure of Gray Iron Produced Via Lost Foam Casting", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 1085-1092, 2009.

۶- پی نوشت

1- Wire Affected Zone

[۶] ع. وحید گلپایگانی و م. دیواندری، "بررسی امکان تولید کامپوزیت به روش ریخته گری فومی"، *مجله ریخته گری*، سال ۲۶، شماره ۸۲، زمستان ۱۳۸۴.

[۷] ع. وحید گلپایگانی، م. دیواندری، "بررسی فازهای غنی از مس در آلیاژهای آلومینیوم"، *مجله ریخته گری*، سال ۲۶، شماره ۸۳، بهار ۱۳۸۵.