

بررسی واکنش و انحلال آهن جامد در جریان غوطه‌وری در آلومینیوم مذاب

حسن رضائیⁱ، حمیدرضا شاهرودیⁱⁱ، امیر رضا شاهان بهبهانیⁱⁱⁱ

چکیده

پدیده‌های انحلال و تشکیل ترکیبات بین‌فلزی در طی تماس آهن جامد و آلومینیوم مذاب در فصل مشترک مشاهده می‌شود. در این پژوهش تلاش شده است به کمک آزمایش‌های شناسایی ساختاری در فصل مشترک از این پدیده‌ها شناخت بهتری به دست آید از این‌رو با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی (SEM) ساختارهای ایجاد شده در فصل مشترک در شرایط غوطه‌وری آهن جامد در آلومینیوم مذاب بدون تلاطم و اغتشاش در ۷۵۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شده است. نتایج نشانگر انجام هم‌زمان انحلال و تشکیل ترکیبات بین‌فلزی بوده و قابل ذکر است که تلاشی و کندگی بخش‌هایی از لایه ترکیبی مکانیسم اصلی ورود آهن به داخل آلومینیوم مذاب بوده است و انحلال صرفاً از طریق نفوذ مستقیم اتم‌های آهن در مذاب آلومینیوم صورت نمی‌گیرد.

کلمات کلیدی:

آهن جامد، آلومینیوم مذاب، انحلال، ترکیب بین‌فلزی، واکنش‌های مایع-جامد

Surveying the Reaction and Solution of Solid Iron in the Process of Immersion in Aluminum Melt

H. Rezaii, H. Shahverdi, A. Shahan

ABSTRACT

Solution phenomena and formation of intermetallic compound during contact of solid iron and aluminum melt was seen in the interface. In this study, the compositional recognition method was used in interface to find a better understanding of such phenomena. To this end, with using optical microscope and SEM, interface structure has been studied in immersion condition without turbulence in 750, 800 and 850 degrees centigrade. The results indicate the cooccurrence of solution and formation of intermetallics. they showed also detachment and destruction of parts of compositional layer is one of the main mechanisms of entering iron atoms in aluminum melt. The solution phenomenon does not occur only with direct diffusion.

KEYWORDS:

Solid Iron, Melt Aluminum, Solution, Intermetallics, solid-liquid reactions

ⁱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مواد دانشگاه تربیت مدرس، metalceramic_h@yahoo.com

ⁱⁱ - استادیار دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، shahverdi@modares.ac.ir

ⁱⁱⁱ - کارشناس ارشد مهندسی مواد_ دستیار پژوهشی amir34@parsonline.net

بنابراین با هدف شناخت بهتر پدیده‌های فصل مشترک آهن جامد در آلومینیوم مذاب در شرایط غوطه‌وری ساکن در زمان-های کوتاه‌تری نسبت به زمان مورد توجه در تحقیقات قبلی آزمایش‌های این پژوهش به انجام رسیده است [۸] و [۹] و [۱۱].

۲- روش تحقیق

برای شناخت پدیده‌های انحلال و تشکیل ترکیبات بین‌فلزی از آزمایش غوطه‌وری ساکن آهن در آلومینیوم مذاب در محدوده دمایی ۷۵۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. برای شناخت بهتر پدیده‌های ایجاد شده در فصل مشترک در زمان‌های ابتدایی تماس و با توجه به تحقیقات پیشین [۹ و ۱۱] محدوده زمانی آزمایش‌های غوطه‌وری ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ثانیه انتخاب شد. در جدول (۳) شرایط آزمایش‌ها ارائه شده است. در این آزمایش‌ها از فولاد کم کربن به صورت سیم نازک با قطر ۰/۷ میلی‌متر به عنوان منبع آهن با ترکیب شیمیایی (جدول ۱) و همچنین آلومینیوم با ترکیب شیمیایی نزدیک به آلومینیوم خالص (جدول ۲) استفاده شد و غوطه‌وری در شرایط عدم اغتشاش در مذاب آلومینیوم انجام گرفت.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی سیم آهنی مورد استفاده در آزمایش‌ها

| عناصر | C | Mn | Si | Al | Fe |
|-----------------|------|------|-----|-------|------|
| درصد وزنی (Wt%) | ۰/۰۸ | ۰/۳۴ | ۰/۱ | ۰/۰۰۶ | Base |

جدول (۲): ترکیب شیمیایی آلومینیوم مورد استفاده در آزمایش‌ها

| عناصر | Si | Fe | Mg | Ti | Ni | Al |
|-----------------|------|------|-------|-------|-------|------|
| درصد وزنی (Wt%) | ۰/۰۳ | ۰/۰۸ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۲ | Base |

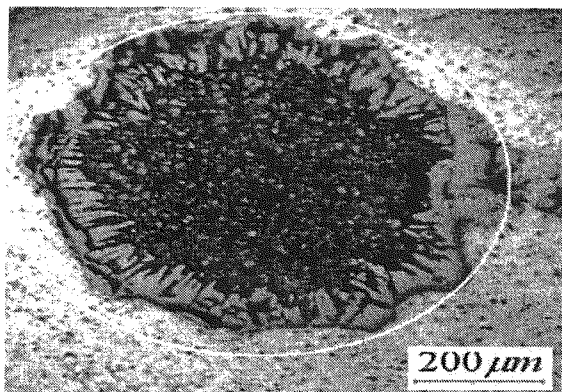
سیم‌های نازک آهنی پس از عملیات چربی‌زدایی با $NaOH$ و اسید شویی با اسید کلریدریک ۲۰٪ و شستشو با آب مقطر برای انجام آزمایشات غوطه‌وری آماده سازی شد. نمونه‌های آلومینیومی در اندازه‌های کوچک به وزن ۱۰ گرم در بوتله‌های آلومینایی به حجم ۳۰ میلی لیتر در کوره الکتریکی مقاومتی تحت فلاکس Coveral 11S ذوب شد. سیم آهنی در مذاب آلومینیوم غوطه‌ور گردید و پس از مدت زمان تعیین شده بوتله همراه با مذاب و سیم آهنی از کوره خارج و به سرعت سرد شد.

بررسی و شناخت پدیده‌های ایجاد شده نیازمند بررسی ساختار فاز آهن، آلومینیوم و فصل مشترک است، از این‌رو نمونه آلومینیومی حاوی آهن غوطه‌ور شده از مقطع عرضی برش داده شد و برای بررسی ساختاری در هر سه ناحیه،

واکنش‌های میان آهن جامد و آلومینیوم مذاب با توجه به اهمیت آن در زمینه‌های مختلفی نظیر آلومینایزینگ، آلیاژسازی، جوشکاری، لحیم‌کاری، تولید کامپوزیت‌های آهن-آلومینیوم و نگهداری مذاب آلومینیوم در محفظه‌های آهنی و ریخته‌گری آلومینیوم در قالب‌های فلزی مورد توجه محققین بوده است [۱ و ۲ و ۳ و ۴]. پژوهشگران متعددی واکنش‌های مایع-جامد را در سیستم آهن جامد و آلومینیوم مذاب بررسی کرده‌اند. Dybkov [۶ و ۷] و Yermenko [۷] این واکنش‌ها را در شرایط وجود تلاطم و اغتشاش در آلومینیوم مذاب بررسی کرده‌اند و Barbir [۳] و Shahverdi [۹ و ۸] در شرایط عدم اغتشاش و غوطه‌وری ساده واکنش‌های مزبور را بررسی نموده‌اند. تحقیقات شامل شناخت مورفولوژی و نوع فازهای تشکیل شده، سینتیک انحلال و سینتیک تشکیل ترکیبات بین‌فلزی بوده است. انجام هم‌زمان دو پدیده انحلال و تشکیل ترکیبات بین‌فلزی و تأثیر آنها بر روی یکدیگر از جمله پیچیدگی‌هایی است که استنتاج یک مدل روشن را در این سیستم با دشواری روبرو ساخته است. Yermenko [۷] در شرایط آزمایشی خود تنها بعد از اشباع مذاب آلومینیوم از اتم‌های آهن تشکیل ترکیبات بین‌فلزی را ممکن دانسته و سینتیک تشکیل ترکیب بین‌فلزی را در شرایط اشباع فاز آلومینیوم از فاز آهن گزارش نموده است. F. Barbir & K. Bouche [۲] در شرایط غوطه‌وری بدون تلاطم در مذاب آلومینیوم گزارش کرده‌اند که بلافاصله پس از تماس آهن جامد با آلومینیوم مذاب لایه‌های آلومینیوم نزدیک آهن از اتم‌های آهن اشباع می‌شوند و پس از تر کردن سطح فاز آهن به وسیله آلومینیوم مذاب ترکیبات بین‌فلزی شروع به شکل‌گیری می‌کنند. Dybkov [۶ و ۷] پدیده انحلال را متناسب با دمای مذاب آلومینیوم قبل از اشباع مذاب از آهن، فرآیند اصلی معرفی کرده و تنها پس از این مرحله به تشکیل ترکیبات بین‌فلزی اشاره نموده است.

Shahverdi و همکارانش در مطالعات خود در این زمینه وجود هم‌زمان واکنش و انحلال را گزارش کرده‌اند و بعلاوه به پیچیدگی‌هایی نظیر اثرات پدیده تلاشی در سرعت بخشیدن به انحلال آهن جامد در آلومینیوم مذاب، عدم مشخص بودن مکانیسم غالب در اولین لحظات تماس آهن جامد و آلومینیوم مذاب و ابهام در چگونگی جوانه‌زنی ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک اشاره کرده‌اند [۹ و ۸]. از آنجا که مکانیسم انحلال آهن جامد در آلومینیوم مذاب بطور اساسی می‌تواند مدل‌های سینتیکی پیش‌بینی ضخامت لایه‌های ترکیبی را تحت تأثیر قرار دهد ضرورت تحقیقات کامل‌تری در این راستا محرز بود

پیشرفت است. فصل مشترک لایه با فاز آلومینیوم کنگره‌ای و نامنظم است مرز اولیه فاز آهن با دایره سفید رنگ مشخص شده است همانطوری که در شکل مشاهده می‌شود حجم فاز آهن و ناحیه ترکیبی موجود از حجم اولیه فاز آهن کمتر بوده که بیانگر انحلال آهن در مذاب آلومینیوم طی غوطه‌وری است.



شکل (۲): تصویر متالوگرافی از لایه ترکیبی که در فصل مشترک آهن-آلومینیوم در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان غوطه‌وری ۳۰ ثانیه تشکیل شده است (محلول اچ نایتال ۵٪)

شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی بازتابشی (SEM) را برای نمونه‌های غوطه‌ور در دماهای ۷۵۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ ثانیه نشان می‌دهد. این تصاویر گویای غیریکنواختی در تشکیل لایه ترکیبی در زمان‌های ابتدایی (۱۰ ثانیه) است بوضوح قابل مشاهده است که در زمان‌های اولیه شرایط ایجاد لایه ترکیبی در همه نقاط بر روی فصل مشترک یکسان نبوده و بنابراین شکل‌گیری لایه ترکیبی اطراف فاز آهن بصورت یکنواخت انجام نشده است. با افزایش دمای غوطه‌وری سطح ناحیه ترکیبی تشکیل شده افزایش یافته است که با توجه به افزایش طبیعی واکنش‌پذیری با دما قابل توجیه است. اما در مناطقی که رشد نواحی ترکیبی بصورت مشهود دیده نمی‌شود نشانه‌ای از ورود مستقیم آهن به داخل آلومینیوم که سبب لاغر شدن سیم آهنی شده و می‌تواند اثبات کننده انحلال مستقیم آهن در آلومینیوم باشد مشاهده نشده است بنابراین در حالیکه به نظر می‌رسد طی ۱۰ ثانیه ابتدایی تماس دو فاز شکل‌گیری نواحی از لایه ترکیبی قابل اثبات است اما در سایر نقاط پیرامون فاز آهن نشانه‌ای از پدیده انحلال را نمی‌توان مشاهده نمود. عدم یکنواختی در تشکیل لایه ترکیبی پیرامون سیم‌های آهنی غوطه‌ور در مذاب آلومینیوم دلایل مختلفی دارد، جوانه‌زنی لایه ترکیبی در فصل مشترک آهن جامد و آلومینیوم مذاب نیازمند مهیا شدن شرایط است و ترشوندگی فاز جامد توسط فاز مذاب از شرایط لازم آن. ترشوندگی تابع

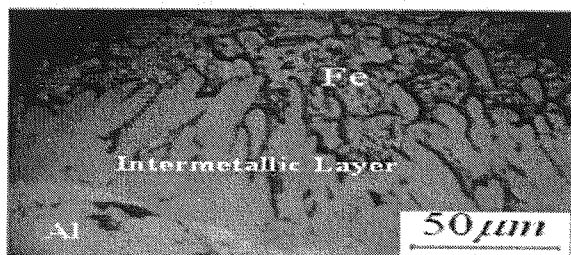
نمونه‌های مناسب جهت متالوگرافی به کمک مانع گرم تهیه شد و با دقت عملیات آماده سازی، پولیش و پرداخت بر روی آنها صورت گرفت سپس نمونه‌ها با محلولهای Kellers برای آلومینیوم و نایتال ۵٪ برای فصل مشترک اچ شده و مورد آزمایش متالوگرافی نوری قرار گرفتند. مرحله بعد به کمک میکروسکوپ الکترونی (SEM) ساختارهای ایجاد شده بررسی شد. لازم به ذکر است که میکروسکوپ الکترونی مورد استفاده در تحقیق حاضر از نوع SEM و مدل XL30 ساخت شرکت فیلیپس از کشور هلند است.

جدول (۳): شرایط دمائی و زمانی آزمایش‌های غوطه‌وری آهن در آلومینیوم

| زمان (ثانیه) | ۱۰ | ۳۰ | ۳۰ |
|--------------|-------|-------|-------|
| دما | | | |
| ۷۵۰ | D_1 | D_2 | D_3 |
| ۸۰۰ | E_1 | E_2 | E_3 |
| ۸۵۰ | F_1 | F_2 | F_3 |

۳- نتایج و بحث

شکل (۱) تصویر متالوگرافی از مقطعی برای نمونه غوطه‌ور در ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۳۰ ثانیه را نشان می‌دهد که در آن سه منطقه لایه ترکیبی، فاز آهن و فاز آلومینیوم قابل تشخیص است ناحیه ترکیبی با یک جبهه رشد دندان‌های به سمت مرکز فاز آهن در حال پیشرفت است. مورفولوژی دندان‌های مشاهده شده برای ناحیه ترکیبی مشابه نتایجی است که سایر پژوهشگران گزارش نموده‌اند [۳ و ۴ و ۸ و ۹ و ۱۱]. طبق گزارش آنها وجود جبهه رشد دندان‌های ناشی از سرعت نفوذ بالای آلومینیوم در ساختار لایه ترکیبی است که موجب رشد سریع و گسترش لایه ترکیبی شده است [۳ و ۴ و ۹].

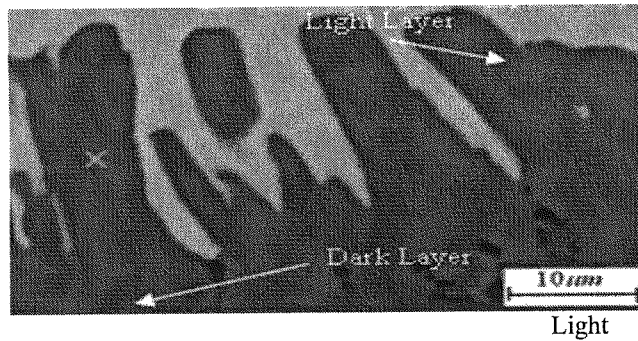


شکل (۱): تصویر متالوگرافی از رشد لایه ترکیبی در میان آهن و آلومینیوم در ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان غوطه‌وری ۳۰ ثانیه (محلول اچ نایتال ۵٪)

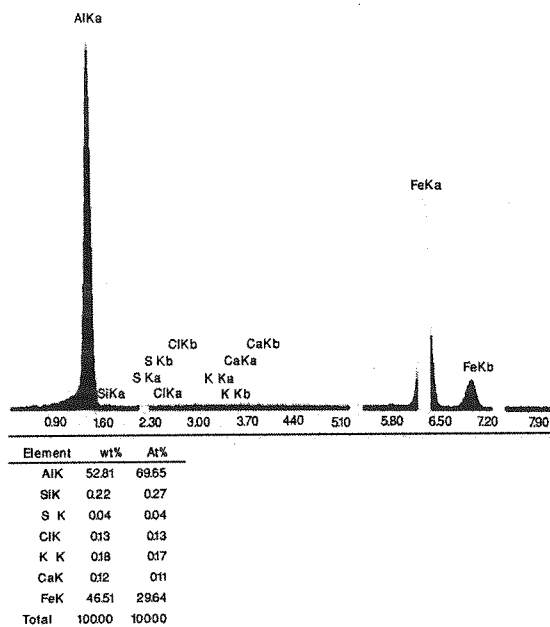
شکل (۲) برای نمونه غوطه‌ور در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان ۳۰ ثانیه نشان می‌دهد که ناحیه ترکیبی محیط فاز آهن را کاملاً احاطه کرده، در عین حال جبهه رشد دندان‌های ناحیه ترکیبی به سمت داخل فاز آهن در حال

آلومینیوم بالاتر در مجاورت فاز آلومینیوم یک فاز با درصد آلومینیوم پایین‌تر در مجاورت فاز آهن است. بر اساس نتایج آزمایش‌های EDX شکل (۴-ب) و بر طبق گزارش سایر محققین فاز خاکستری تیره فاز $FeAl_3$ و فاز خاکستری روشن فاز Fe_2Al_5 می‌باشد. بنابه گفته محققین فاز $FeAl_3$ پس از مراحل ابتدایی و فاز Fe_2Al_5 بدلیل افزایش غلظت آلومینیوم در ناحیه مجاور آلومینیم جوانه‌زنی و رشد می‌کند] ۹ و ۵ و ۴ و ۳.

الف



ب



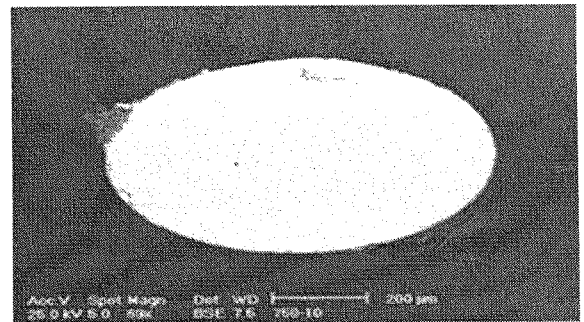
شکل (۴): الف- تصویر میکروسکوپ الکترونی بازتابشی از ناحیه

ترکیبی تشکیل شده در فصل مشترک به‌مراه پیکهای EDX

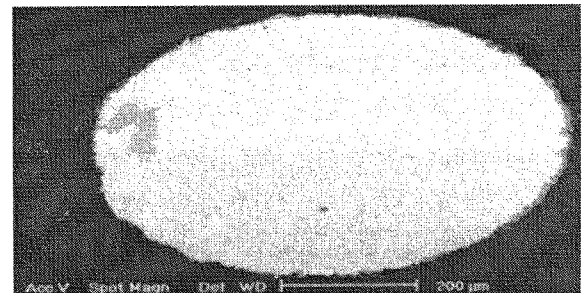
مطابق با شکل (۵) در سیستم دوتایی آهن و آلومینیوم علاوه بر فازهای محلول جامد آهن و آلومینیوم، ترکیبات بین‌فلزی Fe_3Al و $FeAl$ و $FeAl_2$ و Fe_2Al_5 و $FeAl_3$ متناسب با شرایط ترکیبی و دمایی پایدار هستند اما

خصوصیات مختلفی از جمله مورفولوژی اولیه فصل مشترک است بنابراین ممکن است تمام نقاط فصل مشترک آهن با آلومینیوم دارای زمان ترشوندگی یکسانی نباشند [۱۱ و ۹]. ترشوندگی ممکن است به دلیل عوامل دیگری نظیر آلودگی‌ها و پوسته‌های اکسیدی سطحی که مانع از ترشدن فاز جامد در مقیاس اتمی در زمان‌های ابتدایی تماس دو فاز می‌شود، در برخی از نقاط به تأخیر بیفتد بنابراین غیر یکنواختی در تشکیل ترکیب بین‌فلزی در فصل مشترک آهن-آلومینیوم به چشم می‌خورد.

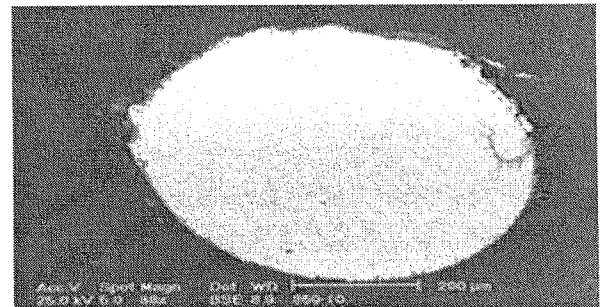
الف



ب



ج

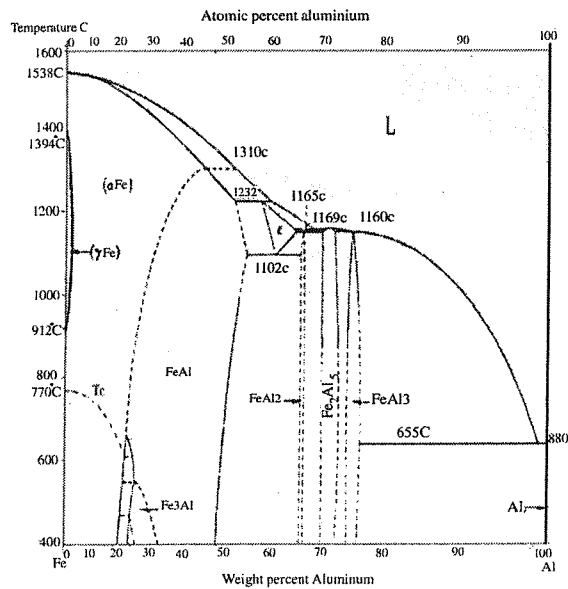
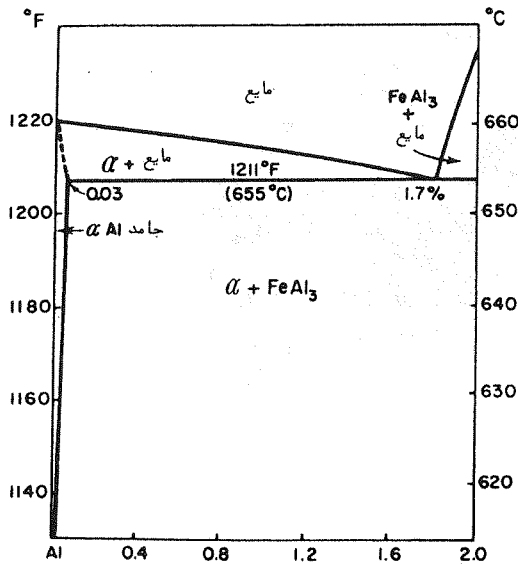


شکل (۳): تصاویر میکروسکوپ الکترونی بازتابشی (SEM) از عدم وجود یکنواختی در رشد لایه ترکیبی الف-۷۵۰ و ۱۰ ثانیه، ب-۸۰۰ و ۱۰ ثانیه ج-۸۵۰ و ۱۰ ثانیه

شکل (۴-الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی بازتابشی (SEM) از فصل مشترک آهن جامد و آلومینیوم مذاب در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۳۰ ثانیه را نشان می‌دهد. حضور دو فاز با کنتراست خاکستری روشن و سطح وسیع تر و خاکستری تیره با سطح محدودتر البته با تفاوت نه چندان زیاد در کنتراست آنها نشانگر وجود یک فاز با درصد

طریق جدا شدن و شناور شدن نواحی ترکیب نیز کاملاً محتمل است بنابراین به نظر می‌رسد مکانیسم جایگزین یا حداقل همراه مکانیسم ورود اتمی آهن به داخل فاز مذاب وجود دارد که سبب تحلیل فاز آهن در آلومینیم مذاب می‌شود و از لحاظ سینتیکی بر انحلال تأثیرگذار بوده و آن را تسریع می‌کند.

الف



شکل (۵): الف- دیاگرام فازی تعادلی آهن و آلومینیم ب- ناحیه یونکتیک دیاگرام آهن-آلومینیم [۱۲ و ۱۰]

برخلاف پیش بینی‌های ترمودینامیکی (تشکیل فاز با حداقل انرژی آزاد) اولین فاز که حضور آن به عنوان فاز اصلی در فصل مشترک آهن جامد و آلومینیم مذاب مورد تأیید محققین مختلف قرار گرفته Fe_2Al_5 است و فاز بعدی که گروهی از پژوهشگران به حضور آن به صورت یک لایه محدود در فصل مشترک آلومینیم و Fe_2Al_5 اشاره کرده‌اند فاز $FeAl_3$ است. دلیل مشاهده انحراف از اصول ترمودینامیکی در سینتیکی رشد فاز Fe_2Al_5 و سرعت نفوذ اتم های آلومینیم در جهت خاصی از ساختار کریستالی این فاز نهفته است [۳ و ۹ و ۸].

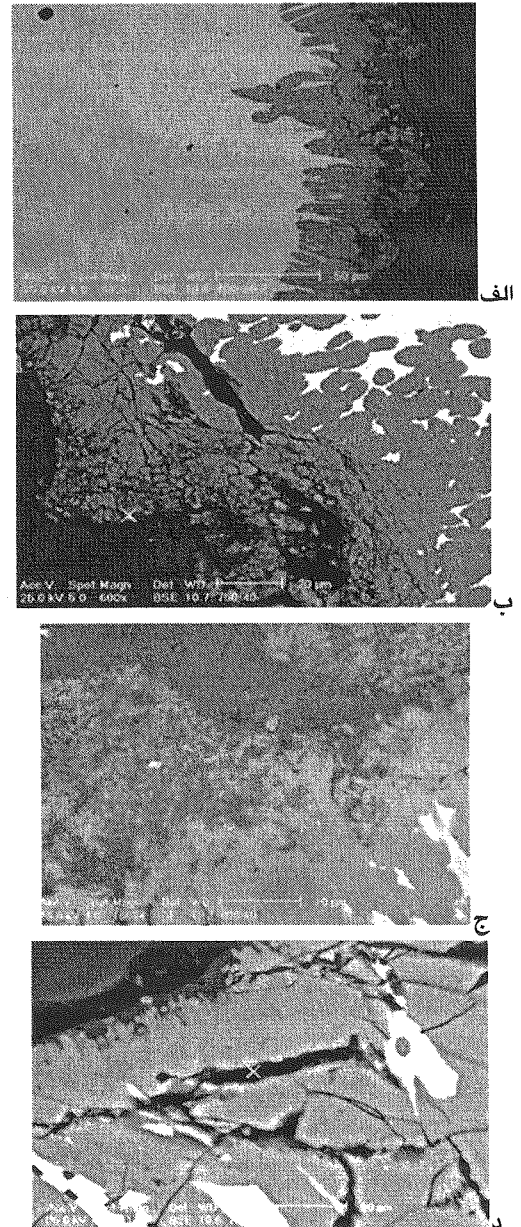
شکل (۶-الف) نمونه غوطه‌ور در ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۳۰ ثانیه با تمرکز در فصل مشترک ناحیه ترکیبی و آلومینیم مذاب را نشان می‌دهد در این تصویر به وضوح مشاهده می‌شود که ذرات نامنظمی از ناحیه ترکیبی کنده شده در داخل فاز آلومینیم در مجاورت فصل مشترک شناور شده است. شکل (۶-ب) تصویر دیگری از همین ناحیه را نشان می‌دهد که در آن کانال‌هایی از جریان مذاب در داخل ناحیه ترکیبی دیده می‌شود و هم زمان به نظر می‌رسد این کانال‌ها با نفوذ در عمق لایه ترکیبی باعث تلاشی و کنده شدن نواحی ترکیبی شده‌اند. شکل (۶-ج) تصویری از فصل مشترک ناحیه ترکیبی با فاز آلومینیم را در نمونه غوطه‌ور شده در ۱۰ ثانیه و در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد که در آن ناحیه علاوه بر تشکیل لایه ترکیبی به وضوح کنده شدن ذرات و تلاشی این ناحیه از همان ابتدای شکل‌گیری دیده می‌شود. شکل (۶-د) ترک‌های ایجاد شده در لایه ترکیبی را که به تدریج رشد نموده و یا به جدا شدن قطعات لایه ترکیبی منجر شده و یا آنکه اجازه نفوذ مذاب در داخل لایه ترکیبی را داده است نشان می‌دهد.

در تمام این تصاویر چه در زمان‌های ابتدایی تماس و چه پس از گذشت زمان بیشتری از غوطه‌وری جزایر منفک شده از لایه اصلی ترکیبی و وجود ترک در درون لایه ترکیبی قابل مشاهده است. طبیعی است جزایر منفک شده از فاز اصلی که کنتراست فازی مشابهی با لایه ترکیبی فلزی در فصل مشترک دارد بدلیل اختلاف جرم حجمی تمایل به شناور شدن در مذاب آلومینیم را داشته و به تدریج از فصل مشترک دور خواهد شد. این پدیده کندگی و تلاشی در داخل ذرات کنده شده و شناور شده مجدداً می‌تواند گسترش یافته و به پراکنش وسیع‌تر ذرات در سراسر مذاب بیانجامد. هر چند تحولات بعدی این ذرات و چگونگی تبدیل آن‌ها به فازهای نهایی دیده شده پس از انجماد فاز آلومینیم نیازمند تحقیق بیشتری است اما همین مشاهدات نشان می‌دهد که پدیده انحلال آنها صرفاً تحت کنترل نفوذ اتم های آهن در آلومینیم مذاب نبوده بلکه انتقال جرم از

آنها به تلاشی و کنده شدن نواحی ترکیبی و متعاقباً ورود و شناور شدن آنها در آلومینیوم مذاب منجر می‌شود. در تئوری‌های کلاسیک انحلال (مطابق با شکل ۷) بیان شده است که برای انحلال فاز جامد در داخل فاز مذاب در فصل مشترک دو فاز غیر هم جنس ابتدا لایه مرزی اشباع از اتم‌های فاز جامد شکل می‌گیرد. این لایه باکنده شدن اتم‌های فاز جامد و ورود آن به داخل لایه مرزی به وجود می‌آید. از این پس با توجه به مکانیسم‌های انتقال جرم فعال در محیط مذاب، اتم‌های فاز جامد وارد شده به لایه مرزی به سایر مناطق مذاب منتقل می‌شود در این حالت تمامی پدیده انحلال از طریق حرکت‌های اتمی قابل تفسیر است [۳ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷]. اگر تلاطم و اغتشاش در محیط مذاب برقرار باشد جابجایی و هم رفت کنترل کننده خواهد بود (شکل ۷-الف) و در نتیجه انحلال سریع تر اتفاق می‌افتد و در شرایط عدم وجود تلاطم و اغتشاش در محیط سرعت انحلال متناسب با نفوذ اتم‌های فاز جامد در مذاب است (شکل ۷-ب). در هر دو حالت انحلال تا آنجا ادامه خواهد یافت که تمامی فاز مایع به حد اشباع از فاز جامد برسد. اما تصاویر میکروسکوپ الکترونی شکل (۶) از فصل مشترک آهن جامد-آلومینیوم مذاب در این پژوهش به وضوح نشان داده است که انحلال آهن جامد در آلومینیوم مذاب از طریق کنده شدن و تلاشی ذرات و حرکت آن‌ها صورت می‌گیرد ذرات کنده شده به دلیل اختلاف وزن مخصوصی که دارند در داخل مذاب شناور شده و به نواحی دیگری از مذاب انتقال می‌یابند. نحوه تبدیل این ذرات به فازهای نهایی داخل ساختار خود نیازمند پژوهش‌های دقیق‌تری است.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات:

- (۱) شواهد نشان داده است لایه ترکیبی از ۱۰ ثانیه به بعد حداقل در بخش‌هایی از فصل مشترک تشکیل می‌شود در حالیکه طی این زمان انحلال مستقیم آهن دیده نشده است.
- (۲) پدیده جوانه‌زنی ناحیه ترکیبی در فصل مشترک آهن-آلومینیوم نیازمند شرایطی است که قطعاً در همه نقاط فصل مشترک وجود ندارد، از این‌رو غیریکنواختی در تشکیل لایه ترکیبی در زمان‌های ابتدایی در دماهای مختلف مشاهده می‌شود.
- (۳) ایجاد ترک در لایه ترکیبی به جدا شدن بخش‌هایی از این لایه و شناور شدن آن در مذاب منجر می‌شود این مکانیسم به ویژه در زمان‌های بعدی می‌تواند در تسریع انحلال نقش مهمی ایفا نماید.
- (۴) شناخت پدیده غالب در فصل مشترک آهن جامد و آلومینیوم مذاب در مدت زمان‌های کمتر از ۱۰ ثانیه نیازمند



شکل (۶): تصویر میکروسکوپ الکترونی بازتابشی (SEM) از تلاشی و کنده لایه ترکیبی ایجاد شده در فصل مشترک میان آهن و آلومینیوم، الف- دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان غوطه‌وری ۳۰ ثانیه، ب- دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان غوطه‌وری ۴۰ ثانیه، ج- دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان غوطه‌وری ۱۰ ثانیه، د- دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان غوطه‌وری ۵۰ ثانیه

پدیده ایجاد ترک‌ها در لایه ترکیبی را می‌توان به شکل‌گیری فاز $FeAl_3$ در حدفاصل فاز Fe_2Al_5 و آلومینیوم مذاب نسبت داد. فاز $FeAl_3$ پس از شکل‌گیری فاز Fe_2Al_5 به دلیل افزایش غلظت آلومینیوم شروع به جوانه‌زنی و رشد می‌کند. ترک‌های ایجاد شده می‌تواند ناشی از تنش‌های حاصل از تشکیل $FeAl_3$ باشد. با توجه به تفاوت ساختمان بلوری دو فاز $FeAl_3$ و Fe_2Al_5 وجود چنین تنشی را می‌توان ناشی از عدم انطباق ساختار اتمی دانست. جوانه‌زنی این ترک‌ها و رشد

بررسی دقیق‌تر ترکیب شیمیایی و فاز شناسی در ابعاد نانومتری به ویژه در لحظات اولیه است که نشان دهد آیا قبل از تشکیل ترکیب بین‌فلزی، غلظت اتم‌های آهن در لایه مرزی اضافه می‌شود یا خیر. همچنین بررسی جوانه‌زنی ترکیبات بین‌فلزی و شناخت دقیق لایه اولیه نیازمند پژوهش‌های تکمیلی است.

۵- منابع و مراجع

- [۱] S.Shankar and D.Apelian, "Mechanism of the Interface Reaction Between Molten Aluminum Alloy and Tool Steel", Metallurgical and Materials Transaction, P.465, (2002).
- [۲] H.K. Balakrishna, V.C. Venkatch and P.k. Philip, "Influence of Collision parameters o the Morphology of Interface in Aluminum-Steel Explosion Welds", Proc.Int.Conf, P.975, (1981).
- [۲] K. Bouche, F. Barbier, A. Coulet, "Intermetallic Compound Layer Growth between Solid iron and Molte aluminum", Materials Science and Engineering, Vol 249, P-167-175, (1998).
- [۴]] A.Bouayad, Ch.Gerometta, A.Belkebir , A.Ambari, "Kinetic interactions between solid iron and molten aluminium", Materials Science and Engineering, Vol363, P- 53-61, (2003).
- [۵] V.I Dybkov, "Reaction Diffusion in Heterogeneous binary Systems", Part I. Growth of the chemical compound layers at the interface between two elementary substances Journal of Materials Sciences, Vol.21 P-30783084 (1986).
- [۶] V.I. Dybkov, " Reaction Diffusion and Solid State Chemical Kinetics", The IPMS Publications, Kyiv (2002).
- [۷] .N. Yermenko , Y.V. Natazon , V.I. Dybkov, "The Effect of Dissolution on the Growth of the Fe2Al5 Interlayer in the Solid Iron-Liquid Aluminium System", Journal of Materials Science, Vol 16, P- 1748-1756,(1981).
- [۸] H.R. Shahverdi, M.R. Ghomashchi, S.Shabestari, J. Hejazi, "Microstructure Analysis of Interfacial Reaction between Molten aluminum and Solid iron", Journal of Materials Processing and Techology, Vol. 124, P-345-352, (2002).
- [۹] H.R. Shahverdi, M.R. Ghomashchi, S.Shabestari, J. Hejazi, "Kinetics and Microstructure Analysis of Solid iron- Liquid aluminum Reaction", International Journal of Engineering Science, Vol.13 No.2, P-91102 , (2002)
- [۱۰] Metals Handbook, 1th Edition ASM International , Vol.63 (1992).
- [۱۱] شاموردی، حمیدرضا، * واکنش‌پذیری آهن جامد و آلومینیوم مذاب در فرآیند رانش واکنشی، رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۷۹).
- [۱۲] طهماسبی، اردشیر، * آلومینیوم، انتشارات جامعه ریخته‌گران ایران، (۱۳۶۴).