

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

آلیاژسازی مکانیکی ترکیب بین فلزی Al_3Fe

و بررسی پارامترهای آسیا

پایان نامه کارشناسی ارشد متالورژی

گرایش استخراج فلزات

ارائه دهنده: علی اکبر هادیان

اساتید راهنما:

دکتر مسعود گودرزی

دکتر حمیدرضا صمیم

بهمن ماه ۱۳۸۲

تقدیم به :

آنانی که دوستان دارند،

و به آنها عشق می ورزیم،

آنهایی که آفتاب زندگی را به ما ارزانی داشتند،

و بودن در کمال آنچه هستیم را آموختند،

نه آرزومند غیر از آنچه هستیم.

تقدیر و تشکر:

با سپاس و تقدیر ویژه و بی پایان از استاد گرامی جناب آقای دکتر گودرزی که در مراحل مختلف این پروژه از هیچ تلاشی برای تسریع و پیشرفت کار و ارزش گذاری به فکر و کار دانشجو از لحاظ علمی، فکری، عملی و در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی و زمان دریغ نکردند، هم درس علم و عمل آموختیم، هم درس زندگی.

همچنین با تشکر از جناب آقای دکتر صمیم که در بخشی از مراحل تجربی و تحلیلی پروژه مرا یاری دادند.

همچنین تشکر ویژه ای از جناب آقای مهرجو مسئول محترم آزمایشگاه های پیرو و هیدروم탈ورژی به دلیل کمک های بی شائبه شان دارم.

و با سپاس از مسئولین محترم آزمایشگاه آنالیز دانشگاه صنعتی مالک اشتر بالاخص آقای مهندس کاروانه و سرکار خانم مهندس عادلی مسئول محترم آزمایشگاه آنالیز اشعه ایکس دانشکده مواد دانشگاه علم و صنعت.

و من ا... التوفیق.

فهرست مطالب

۱	..... فصل اول: مروری بر منابع
۲	..... ۱-۱- مقدمه
۳	..... ۲-۱- ترکیبات بین فلزی
۴	..... ۳-۱- آلومینایدها
۸	..... ۴-۱- آلومینایدهای آهن
۱۰	..... ۱-۴-۱- ترکیب بین فلزی Al_3Fe
۱۰	..... ۵-۱- برخی از کاربردهای آلومینایدهای آهن
۱۱	..... ۶-۱- روش های تولید آلومینایدهای آهن
۱۴	..... ۷-۱- فرآیند آلیاژسازی مکانیکی
۱۵	..... ۸-۱- روند تولید مواد توسط آلیاژسازی مکانیکی و ابزار لازم
۱۶	..... ۹-۱- انواع مختلف آسیاهای گلوله ای مورد استفاده در آلیاژسازی مکانیکی
۱۶	..... ۱-۹-۱- آسیاهای گلوله ای افقی
۱۷	..... ۲-۹-۱- آسیاهای گلوله ای افقی کنترل شده بوسیله نیروی مغناطیسی
۱۸	..... ۳-۹-۱- آسیاهای گلوله ای لرزشی
۱۸	..... ۴-۹-۱- آسیاهای گلوله ای ماهواره ای
۱۹	..... ۵-۹-۱- آسیاهای گلوله ای سایشی
۲۱	..... ۱۰-۱- عوامل موثر در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی
۲۱	..... ۱-۱۰-۱- انرژی آسیا
۲۲	..... ۲-۱۰-۱- نسبت وزنی گلوله به پودر
۲۳	..... ۳-۱۰-۱- زمان آسیا
۲۳	..... ۴-۱۰-۱- جنس و اندازه گلوله
۲۳	..... ۵-۱۰-۱- درجه حرارت
۲۴	..... ۶-۱۰-۱- کنترل اتمسفر
۲۴	..... ۷-۱۰-۱- انتخاب عامل کنترل کننده فرآیند
۲۵	..... ۱۱-۱- پدیده های همراه با آلیاژسازی مکانیکی
۲۸	..... ۱۲-۱- مکانیزم آلیاژسازی مکانیکی
۳۱	..... ۱۳-۱- کاربردهای روش آلیاژسازی مکانیکی

- ۱۴-۱- مزایا و معایب آلیاژسازی مکانیکی..... ۳۲
- ۱۵-۱- وقوع پدیده آمورف شدن در آلیاژسازی مکانیکی..... ۳۳
- ۱۶-۱- تولید آلومینایدهای آهن به روش آلیاژسازی مکانیکی..... ۳۶

فصل دوم: روش تحقیق..... ۳۹

- ۱-۲- مقدمه..... ۴۰
- ۲-۲- مواد و تجهیزات..... ۴۰
- ۱-۲-۲- مواد اولیه..... ۴۰
- ۲-۲-۲- دستگاه آسیا..... ۴۰
- ۳-۲- روش انجام آزمایش‌ها..... ۴۱
- ۱-۳-۲- فرآیند آلیاژسازی مکانیکی..... ۴۱
- ۲-۳-۲- عملیات حرارتی..... ۴۳
- ۴-۲- ارزیابی ذرات پودر..... ۴۴
- ۱-۴-۲- آزمایش‌های پراش پرتو ایکس (XRD)..... ۴۴
- ۲-۴-۲- تعیین اندازه دانه‌ها..... ۴۵

فصل سوم: نتایج آزمایش..... ۴۷

- ۱-۳- آلیاژسازی مکانیکی مخلوط $Al_{75}Fe_{25}$ ۴۸
- ۱-۱-۳- تغییرات ساختار داخلی بدون استفاده از عامل کنترل کننده فرآیند..... ۴۸
- ۲-۱-۳- تغییرات ساختار داخلی با استفاده از عامل کنترل کننده فرآیند..... ۵۱
- ۲-۳- نقش عامل کنترل کننده فرآیند..... ۵۳
- ۳-۳- اثر نسبت وزنی گلوله به پودر..... ۵۸
- ۴-۳- اثر اندازه گلوله‌ها..... ۶۰
- ۵-۳- اثر عملیات حرارتی بر روی استحاله‌های فازی در ذرات پودر..... ۷۰

فصل چهارم: تحلیل نتایج..... ۷۸

- ۱-۴- آلیاژسازی مکانیکی مخلوط $Al_{75}Fe_{25}$ ۷۹
- ۱-۱-۴- تاثیر کار مکانیکی بر مخلوط $Al_{75}Fe_{25}$ بدون استفاده از عامل کنترل کننده فرآیند..... ۷۹
- ۲-۱-۴- تاثیر کار مکانیکی بر مخلوط $Al_{75}Fe_{25}$ در حضور عامل کنترل کننده فرآیند..... ۸۰
- ۲-۴- اثر نسبت وزنی گلوله به پودر..... ۸۴

۸۹	.....۳-۴ اثر اندازه گلوله‌ها
۹۰	.....۴-۴ تاثیر عملیات حرارتی پودر
۹۲	.....نتیجه گیری
۹۴	.....پیشنهادات
۹۵	.....منابع و مراجع

چکیده

در این تحقیق ساخت آلومیناید آهن Al_3Fe به روش آلیاژسازی مکانیکی مخلوط $Al_{75}Fe_{25}$ مورد بررسی قرار گرفت. تاثیر پارامترهایی نظیر زمان، عامل کنترل کننده فرآیند، نسبت وزنی گلوله به پودر، اندازه گلوله ها و عملیات حرارتی پس از آلیاژسازی مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات ایجاد شده در ساختار داخلی ذرات پودر در طی آلیاژسازی مکانیکی توسط پراش پرتو ایکس (XRD) بررسی شد.

نتایج آزمایش ها نشان می دهد که ترکیب بین فلزی $Al_{13}Fe_4$ می تواند بدون استفاده از عامل کنترل کننده فرآیند در زمان ۵۰ ساعت بدست آید ولی چسبندگی پودرها به جداره ی ظرف بسیار زیاد و غیر قابل قبول خواهد بود. با افزودن مقادیر مختلف عامل کنترل کننده فرآیند، مشاهده گردید که هیچ ترکیب خاصی پس از ۵۰ ساعت کارمکانیکی بدست نمی آید و فقط هر چه مقدار عامل کنترل کننده کمتر باشد تشکیل ترکیب در زمان کمتر صورت می گیرد. نتایج آزمایش در مورد مخلوط $Al_{75}Fe_{25}$ نشان می دهد که با افزایش زمان آسیا کردن تا ۲۰۰ ساعت ترکیب بین فلزی $Al_{13}Fe_4$ نمی تواند صرفاً پس از آلیاژسازی مکانیکی بدست آید و تنها ترکیب بین فلزی Al_5Fe_2 تشکیل می گردد.

از طرفی افزایش نسبت وزنی گلوله به پودر از ۷/۱ به ۱۲/۱ و ۲۰/۱ زمان تشکیل فاز Al_5Fe_2 را کاهش می دهد. افزایش اندازه گلوله ها (با یک نسبت وزنی گلوله به پودر) تاثیر زیادی بر تشکیل فاز Al_5Fe_2 ندارد. با انجام عملیات حرارتی بر روی نمونه ها مشخص شد که امکان تشکیل ترکیب بین فلزی Al_5Fe_2 در زمان های کمتر وجود دارد.

فصل اول

مروری بر منابع

۱-۱- مقدمه

استفاده از مواد نو یکی از راه کارهای اصلی در پیشرفت تکنولوژی به شمار می‌رود. در این میان مهندسين به کمک علم مواد و شیوه‌های تولید نوین، مواد جدیدی با ویژگی‌های کاربردی خاص پدید می‌آورند. نیاز صناعی نظیر هوا- فضا، تولید انرژی، اتومبیل‌سازی و شیمیایی به موادی با استحکام بالاتر، وزن مخصوص کمتر، دمای کاری بالاتر و با مقاومت بیشتر در برابر اکسیداسیون و خوردگی تحقیقات وسیعی را در زمینه مواد نو و پیشرفته به دنبال داشته است.

ترکیبات بین فلزی گروهی از مواد پیشرفته هستند که در سه دهه اخیر توجه محققین بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. ترکیبات بین فلزی به خاطر چگالی پایین، استحکام بالا، نقطه ذوب نسبتاً بالا در اکثر ترکیبات بین فلزی، مقاومت در برابر تغییر شکل، مقاومت سایشی و اکسیداسیون خوب و خواص سطحی مناسب مورد توجه زیادی واقع شده‌اند. مهمترین عیبی که عموماً در ترکیبات بین فلزی وجود دارد انعطاف‌پذیری کم این ترکیبات می‌باشد که باعث شده تا استفاده از این ترکیبات بین فلزی به طور گسترده صورت نپذیرد [۱-۵].

در میان ترکیبات بین فلزی فراوانی که وجود دارند آلومیناها و به خصوص آلومینایدهای آهن، نیکل و تیتانیم از جمله موادی هستند که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. روش‌های مختلفی برای تولید ترکیبات بین فلزی مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به فرآیندهای ذوب و ریخته‌گری، رانش^۱، اسپری فورمینگ، انجماد سریع، سنتز احتراقی، سنتز واکنش‌زا اشاره نمود [۳-۹]. یکی از روش‌های تولید که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است روش آلیاژسازی مکانیکی می‌باشد. در روش آلیاژسازی مکانیکی مخلوطی از پودر عناصر سازنده به همراه تعدادی گلوله در یک آسیا قرار داده می‌شوند.

در اثر چرخش آسیا از طرف گلوله‌ها به مخلوط پودر نیرو وارد شده و به تدریج آلیاژسازی صورت می‌گیرد. از جمله مزایای این روش نسبت به روش‌های دیگر تولید، می‌توان به یکنواختی ساختار تولید شده، ریزتر بودن اندازه دانه‌های محصول نهایی، انجام فرآیند در دمای محیط و ارزان‌تر بودن تجهیزات مورد استفاده اشاره کرد [۱۰ و ۱۱].

هدف از این تحقیق بررسی امکان ساخت ترکیب بین فلزی Al_3Fe با روش آلیاژسازی مکانیکی و تا اندازه‌ای بررسی پارامترهای موثر بر فرآیند و تعیین نحوه تاثیر آنها می‌باشد. به این منظور تاثیر پارامترهایی مانند زمان، عامل کنترل کننده فرآیند، نسبت وزنی گلوله به پودر، اندازه گلوله‌های آسیا و عملیات حرارتی پس از کار مکانیکی در روند تولید Al_3Fe مورد مطالعه قرار گرفت.

۱-۲- ترکیبات بین فلزی

وقتی که یک فلز A با یک فلز B آلیاژ می‌شود، بسته به ساختمان کریستالی، الکترونگاتیویته، ظرفیت‌ها و اندازه‌ی نسبی اتم‌های آنها و درجه حرارت، چندین نوع ساختار و نظم اتمی می‌تواند بدست آید. اگر دو نوع اتم رفتار یکسانی داشته باشند محلول جامد ایجاد می‌گردد، اما فقط در تعداد کمی از سیستم‌های آلیاژی محلول جامد کامل در تمامی گستره‌ی A تا B وجود دارد. در بسیاری از سیستم‌های آلیاژی عنصر دوم تا حدی در زمینه حل شده و محلول جامد ایجاد می‌کند، این نوع محلول جامد را محلول جامد اولیه می‌نامند، در غلظت‌های بالاتر، عنصر دوم فازهای جدید را ایجاد کرده که این نوع فازها را فازهای میانی می‌نامند. این فازها معمولاً ساختاری متفاوت از اجزا بوجود آورنده خود دارند. چنانچه فازهای میانی دارای گستره پایداری وسیع و بصورت تصادفی باشند محلول جامد میانی نامیده می‌شوند و چنانچه محدوده پایداری فازهای میانی کم و ساختار آنها منظم باشد به آنها ترکیبات بین فلزی گفته می‌شود [۱۲ و ۱۳].

ساختار منظم در ترکیب بین فلزی با کاهش درجه حرارت و در زیر یک دمای بحرانی ایجاد می‌گردد. ترکیبات بین فلزی منظم معمولاً نسبت‌های موازنه‌ای ساده‌ای دارند و در محدوده نسبتاً باریکی از ترکیب شیمیایی تشکیل می‌شوند، هر چند درجه نظم شبکه با افزایش انحراف از ترکیب موازنه‌ای کاهش می‌یابد. ساختار ترکیبات بین فلزی معمولاً پیچیده و متفاوت از ساختار اجزاء سازنده آن می‌باشد [۱۴و۷].

تاکنون ترکیبات بین فلزی متعددی با دمای ذوب بالا شناخته شده است، اما در سال‌های اخیر آلومینایدها به عنوان مواد ساختمانی، مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. از مهمترین دلایل توجه به آلومینایدها خواصی همچون چگالی کم، نسبت استحکام به وزن بالا، نقطه ذوب‌های نسبتاً بالا و مقاومت اکسیداسیون، خوردگی و سولفیداسیون خوب می‌باشد. مقاومت اکسیداسیون، خوردگی و سولفیداسیون به دلیل تشکیل پوسته اکسیدی محافظ Al_2O_3 می‌باشد. اما این ترکیبات آلومینایدهای خواص نامطلوبی هم دارند که مهمترین آنها انعطاف پذیری کم در دمای محیط و استحکام خزشی پایین در دماهای بالا می‌باشد که مهمترین مانع بر سر راه استفاده از این مواد به عنوان مواد مهندسی می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه افزایش انعطاف‌پذیری ترکیبات بین فلزی صورت گرفته است. اضافه کردن عناصر آلیاژی، کنترل اتمسفر محیط، کاهش اندازه دانه، استفاده از روشهای تولید جدید، کنترل ریز ساختار، کنترل عیوب و ناخالصی‌ها، کامپوزیت کردن با ذراتی نظیر اکسیدها و عملیات حرارتی از جمله راه‌های ارائه شده برای افزایش انعطاف‌پذیری آلومینایدها می‌باشند [۱۵،۳-۱۸].

۱-۳- آلومینایدها

آلومینایدهای نیکل، آهن و تیتانیوم مهمترین آلومینایدها می‌باشند. برخی از خواص این آلومینایدها در جدول ۱-۱ ارائه شده است.

جدول ۱-۱ خواص آلومینایدهای نیکل، آهن و تیتانیم [۱۴].

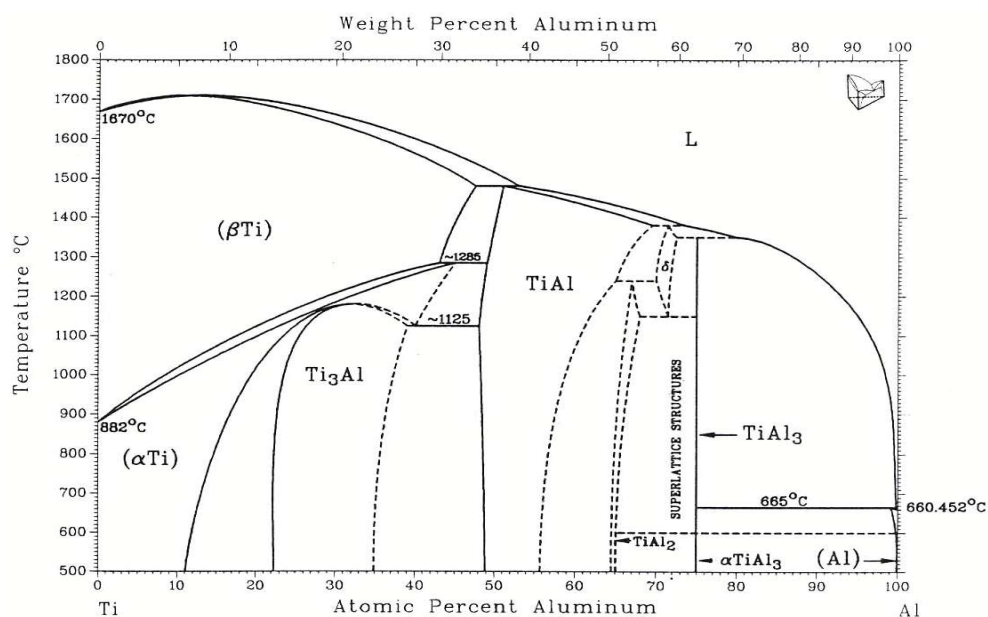
آلیاژ	ساختمان کریستالی	مدول یانگ GPa	چگالی g/cm ³	نقطه ذوب °C	دمای بحرانی منظم شدن °C
Ni ₃ Al	L1 ₂ (fcc)	۱۷۹	۷/۵	۱۳۹۰	۱۳۹۰
NiAl	B2 (bcc)	۲۹۴	۵/۸۶	۱۶۴۰	۱۶۴۰
Fe ₃ Al	D0 ₃ (bcc)	۱۴۱	۶/۷۲	۱۵۴۰	۵۴۰
	B2 (bcc)	...	...	۱۵۴۰	۷۶۰
FeAl	B2 (bcc)	۲۶۱	۵/۵۶	۱۲۵۰	۱۲۵۰
Ti ₃ Al	D0 ₁₉ (hcp)	۱۴۵	۴/۲	۱۶۰۰	۱۱۰۰
TiAl	L1 ₀ (tetragonal)	۱۷۶	۳/۹۱	۱۴۶۰	۱۴۶۰
TiAl ₃	D0 ₂₂ (tetragonal)	...	۳/۴	۱۳۵۰	۱۳۵۰

شکل ۱-۱ دیاگرام فازی سیستم آلیاژی Ti-Al را نشان می‌دهد. ترکیبات بین فلزی تعادلی

در سیستم آلیاژی Ti-Al عبارتند از: TiAl , Al_2Ti , Al_3Ti و (γ) Ti_3Al و (α_2) . از میان این ترکیبات

TiAl و Ti_3Al مهمترین ترکیبات هستند که برای کاربردهایی نظیر قطعات بدنه و موتور فضاپیماها

مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳، ۱۸-۲۰].



شکل ۱-۱-۱ دیاگرام تعادلی سیستم آلیاژی Ti-Al [۳].

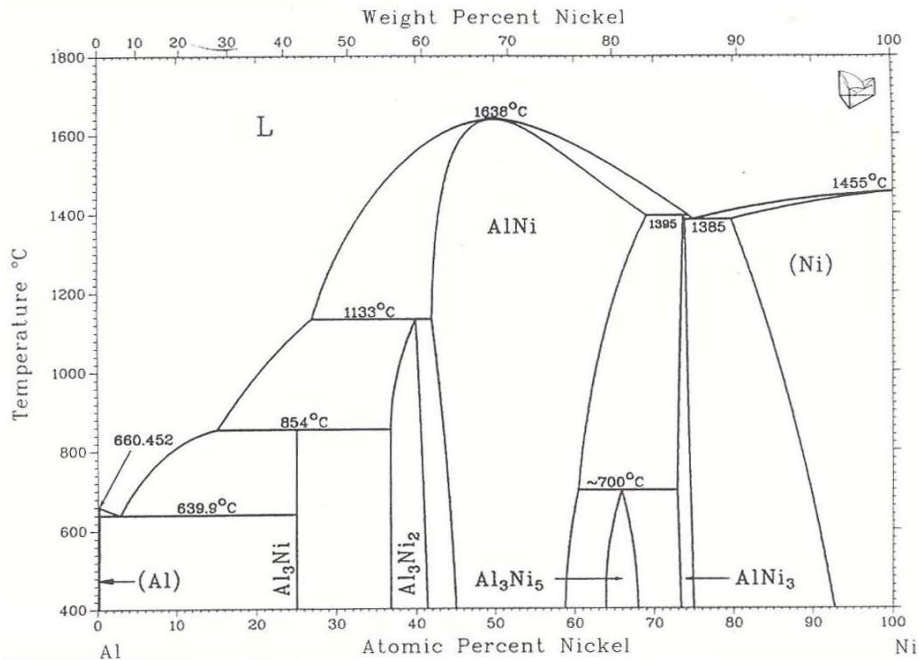
آلیاژهای پایه TiAl با داشتن چگالی حدود 4 g/cm^3 ، استحکام در دماهای بالا (تا حدود 1000°C) و مقاومت اکسیداسیون خوب، بسیار مورد توجه قرار گرفته اند [۳، ۲۱ و ۲۲]. این ترکیب در دمای محیط دارای چقرمگی پایینی می باشد، اما با کاهش میزان آلومینیم (تا کمتر از ۵۰ درصد اتمی) و تشکیل Ti_3Al به عنوان فاز دوم چقرمگی قابل قبولی نشان می دهد [۳ و ۱۹].

همانند اغلب ترکیبات بین فلزی آلومینایدهای تیتانیم نیز قابلیت شکل پذیری کمی در دمای محیط دارند. تحقیقات نشان می دهند که ترکیبات حاوی دو فاز TiAl و Ti_3Al بیشترین قابلیت شکل پذیری را دارا هستند. این مساله باعث شده آلومینایدهای تیتانیم دو فازی در سال های اخیر بیشترین توجه را به خود جلب کنند [۳]. برخی از مهمترین خواص آلومینایدهای تیتانیم در جدول ۱-۲ آورده شده است.

شکل ۱-۲ دیاگرام فازی نیکل - آلومینیم را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود سیستم آلیاژی نیکل - آلومینیم شامل ترکیبات بین فلزی Ni_3Al ، Al_3Ni_5 ، NiAl ، Al_3Ni_2 ، Al_3Ni می باشد.

جدول ۱-۲ خواص آلیاژهای آلومیناید تیتانیم و سوپرآلیاژها [۳].

خواص	TiAl	Ti ₃ Al	سوپرآلیاژها
چگالی (g/cm^3)	۳/۸-۴	۴/۱-۴/۷	۸/۳
مدول یانگ (GPa)	۱۶۰-۱۷۵	۱۲۰-۱۴۵	۲۰۶
انعطاف پذیری (%)	۱-۳	۲-۵	۳-۵
استحکام تسلیم (MPa)	۴۰۰-۶۵۰	۷۰۰-۹۰۰	۱۱۰۰
استحکام کششی (MPa)	۴۵۰-۸۰۰	۸۰۰-۱۱۴۰	۴۸۰-۱۲۰۰
حد پایداری فاز ($^\circ\text{C}$)	۱۴۴۰	۱۱۸۰	۱۴۵۰
حد خزش ($^\circ\text{C}$)	۹۰۰	۷۵۰	۱۰۹۰
حد اکسیداسیون ($^\circ\text{C}$)	۹۰۰	۶۵۰	۱۰۹۰
ضریب هدایت حرارت ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۲۲	۷	۱۱



شکل ۱-۲- دیاگرام تعادلی سیستم آلیاژی نیکل-آلومینیم [۳].

آلومینایدهای نیکل نظیر $NiAl$ و Ni_3Al از جمله مواد پیشرفته هستند که از خواص مهندسی منحصر بفردی نظیر چگالی پایین، مقاومت سایشی زیاد، استحکام گرم بالا، ضریب اصطکاک کم، هدایت حرارتی بالا و مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون مناسب در دمای بالا برخوردارند [۳].

بعلاوه این مواد اغلب نقطه ذوب بالاتری نسبت به سوپرآلیاژها دارند و همچنین بدلیل داشتن پیوندهای فلزی، چقرمگی بیشتری نسبت به سرامیکها بروز می دهند. نتایج تحقیقات نشان می دهد که آلومینایدهای نیکل مواد مناسبی برای ساخت قطعات مهندسی، پوشش دادن اجزا و بعنوان ذرات تقویت کننده در مواد مرکب برای کاربرد در صنایع هوایی، فضایی و خودرو می باشند [۳].

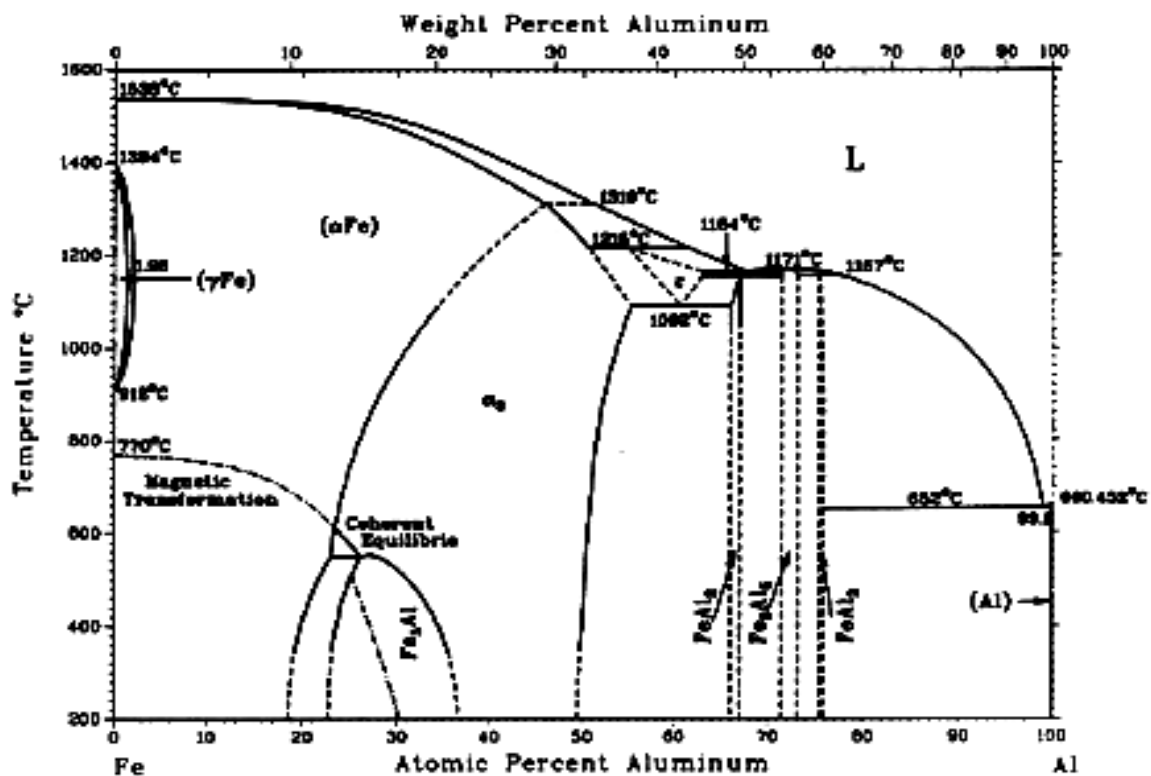
مهمترین محدودیت برای استفاده از این مواد چقرمگی پایین و شکل پذیری کم آنها بخصوص در دمای محیط است. برای غلبه بر این مشکلات راه های متعددی نظیر کنترل ریزساختار، کاهش اندازه دانه ها و اصلاح ترکیب شیمیایی پیشنهاد گردیده است. خواص مکانیکی و متالورژیکی Ni_3Al با اضافه کردن عناصر آلیاژی از قبیل Cr, Mo, Zr, Hf و B بهبود می یابد [۳].

۴-۱- آلومینایدهای آهن

در شکل ۱-۳ دیاگرام فازی تعادلی سیستم دوتایی Fe-Al نشان داده شده است. همانطور که از این دیاگرام مشاهده می شود در سیستم آلیاژی آهن و آلومینیم پنج ترکیب بین فلزی شامل $FeAl_3$ و Fe_2Al_5 , $FeAl_2$, $FeAl$, Fe_3Al وجود دارد.

آلومینایدهای آهن به دلیل اینکه عناصر تشکیل دهنده ی ارزانی دارند توجه زیادی را به خود معطوف کرده اند. در این میان ترکیبات بین فلزی $FeAl$ و Fe_3Al بیشترین توجه و کاربرد را به خود اختصاص داده اند [۳].

همانند اکثر ترکیبات بین فلزی انعطاف پذیری آلومینایدهای آهن نیز در دمای محیط کم می باشد. از طرفی استحکام خزشی آلومینایدهای آهن در دمای بالا ناکافی است. بنابراین مجموع دو فاکتور انعطاف پذیری کم در دمای محیط و استحکام خزشی نامناسب در دمای بالا، سبب شده تا توسعه و کاربرد آلومینایدهای آهن محدود شود [۲۳ و ۳].



شکل ۱-۳- دیاگرام تعادلی آهن - آلومینیم [۳].

آلومینایدهای آهن در دمای محیط چقرمگی پایینی دارند و رفتار آنها هنگام شکست نیز بستگی به میزان آلومینیم موجود در آن دارد. آلومینایدهای آهن با بیشتر از ۴۰ درصد اتمی آلومینیم شکست ترد بروز می‌دهند، اما در کمتر از ۴۰ درصد اتمی آلومینیم چقرمگی آنها افزایش می‌یابد و در ۲۵ درصد اتمی آلومینیم به حداکثر می‌رسد. آلومینایدهای آهن علاوه بر تردی ذاتی که با افزایش مقدار آلومینیم دارند، دارای تردی هیدروژنی نیز هستند که در اثر تشکیل اتم‌های هیدروژن در نتیجه ی واکنش آلومینیم با رطوبت هوا به وجود می‌آید و مهمترین عامل در تردی آلومینایدهای آهن می‌باشد. تشکیل لایه اکسید آلومینیم تا حدی از تردی ناشی از عوامل محیطی جلوگیری می‌کند [۳].

افزودن عنصر آلیاژی بور به آلومینایدهای آهن نیز چقرمگی آنها را بهبود می‌بخشد. بور با افزایش چسبندگی مرزخانه‌ها باعث افزایش انعطاف پذیری در FeAl می‌شود. علاوه بر افزودن عناصر آلیاژی، ایجاد ساختار ریزدانه با روش‌هایی مانند انجماد سریع و آلیاژسازی مکانیکی نیز منجر به بهبود چقرمگی در دمای محیط می‌گردد [۱۵ و ۳].

از جمله خصوصیات که باعث شده تا آلومینایدهای آهن مورد توجه قرار گیرند مقاومت در برابر اکسیداسیون، مقاومت به خوردگی و مهمتر از آنها مقاومت در برابر سولفیداسیون می‌باشد [۳، ۱۴، ۱۷ و ۲۴]. مقاومت به سولفیداسیون باعث استفاده این مواد در محیط‌های سولفیدی نظیر واحدهای گاززدایی زغال سنگ می‌باشد. مقاومت به اکسیداسیون، خوردگی و سولفیداسیون

به دلیل وجود آلومینیم بیشتر، بالاتر از Fe₃Al می‌باشد [۱۷ و ۲۵].

یکی دیگر از خصوصیات آلومینایدهای آهن رفتار غیر عادی تنش تسلیم در مقابل افزایش دما می‌باشد به گونه‌ای که با افزایش دما تنش تسلیم آنها افزایش می‌یابد و پس از عبور از دمای بحرانی منظم شدن تنش تسلیم کاهش می‌یابد [۲۵ و ۳].

۱-۴-۱- ترکیب بین فلزی Al_3Fe

در قسمت انتهایی نمودار آلومینیم-آهن، در دمای $652^{\circ}C$ یوتکتیک $Al-Al_3Fe$ وجود دارد و ترکیب آن دارای $2/2-1/7$ درصد آهن می باشد. حلالیت آهن در آلومینیم جامد در حالت تعادل، $0/03-0/05$ درصد وزنی در دمای یوتکتیک می باشد و در دمای $427^{\circ}C$ به $0/007$ درصد می رسد. فاز در تعادل با آلومینیم معمولاً بصورت Al_3Fe ($40/8$ درصد وزنی آهن) بوده و ساختار بلوری، فرمولی بین Fe_4Al_{13} ($38/9$ درصد وزنی آهن) و Fe_6Al_{19} ($39/5$ درصد وزنی آهن) را نشان می دهد. ترکیب Al_3Fe در دمای $1157^{\circ}C$ مستقیماً از مذاب تشکیل می شود. شبکه بلوری آن مونوکلینیک می باشد و در سلول واحد آن 102 اتم وجود دارد. پارامترهای شبکه بدین صورت می باشد [۲۶، ۲۳، ۳ و ۲۷]:

$$\beta = 107/8^{\circ} \text{ و } a = 1/549 \text{ nm}, b = 0/808 \text{ nm}, c = 1/248 \text{ nm}$$

چگالی ترکیب $3/896 \text{ g/cm}^3$ ، ضریب انبساط حرارتی $11/9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ برای محدوده دمایی $127-227^{\circ}C$ و $15/2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ برای محدوده دمایی $127-627^{\circ}C$ می باشد. هدایت حرارتی در دمای حدود $327^{\circ}C$ ، $0/8 \times 10^{-3} \text{ Wm}^{-1}C$ می باشد، ولی در عمل ضریب هدایت حرارتی این ترکیب به واسطه ی وجود ترک در آن بسیار کمتر است. گرانبوی آلیاژهای مذاب با افزایش آهن، زیاد گردیده و تغییر قابل ملاحظه ای در کشش سطحی ایجاد نمی گردد. هدایت حرارتی با افزایش آهن کاهش می یابد. مدول الاستیک به ازای افزایش هر یک درصد آهن، 25 درصد افزایش می یابد [۲۸].

۱-۵- برخی از کاربردهای آلومینایدهای آهن

مجموعه خصوصیات ذکر شده در بالا به علاوه ی ارزان بودن مواد اولیه موجب شده تا توجه زیادی به آلومینایدهای آهن برای کاربرد در دماهای بالا و در محیط های خورنده به منظور

جایگزینی برای فولادهای زنگ‌نزن، چدن‌ها و حتی سوپرآلیاژها معطوف شود. اما خصوصیات نظیر انعطاف‌پذیری کم در دمای محیط و کاهش استحکام و مقاومت خزشی کم در دماهای بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد موانعی بزرگ در کاربرد این مواد می‌باشد.

آلومینایدهای آهن به دلیل مقاومت عالی به اکسیداسیون و سولفیداسیون به عنوان مبدل حرارتی در موتور توربین‌های گازی و به عنوان فیلترهای جداکننده مواد جامد از گاز استفاده می‌شوند [۲۸، ۲۳، ۳]. همچنین ترکیب Al_3Fe به دلیل چگالی نزدیک به آلومینیم ($3/986 \text{ g/cm}^3$)، سختی بالا (نزدیک به ۱۰۰۰ ویکرز)، ترد و شکننده بودن، پایین بودن دمای تشکیل ترکیب بین فلزی و حفظ پایداری تا نزدیک نقطه ذوب برای ساخت کامپوزیت ذره‌ای مناسب می‌باشد [۲۹].

۱-۶- روش‌های تولید آلومینایدهای آهن

آلومینایدهای آهن توسط روش‌های مختلف شامل ذوب و ریخته‌گری، انجماد سریع، سنتز خود انتشاری دمای بالا، سنتز واکنش زوآ و آلیاژسازی مکانیکی تولید شده‌اند [۷-۹]. در میان روش‌های ذکر شده روش ذوب و ریخته‌گری را می‌توان اولین و اقتصادی‌ترین روش برای تولید آلومینایدهای آهن برشمرد [۲۸، ۲۰ و ۳۰]. در این روش محصول توسط روش‌هایی نظیر متالورژی شمش، ریخته‌گری دقیق و انجماد جهت‌دار تولید می‌شوند [۲۰، ۳۱ و ۳۲]. مشکلاتی که در روش ذوب و ریخته‌گری وجود دارد عبارتند از: ایجاد جدایش در ساختار ریختگی، ایجاد ترک‌های گرم و سرد، ایجاد ساختارهای درشت‌دانه و دمای ذوب بالای ترکیبات بین‌فلزی [۷ و ۹]. روش سنتز خود انتشاری دمای بالا روش دیگری است که در تولید آلومینایدهای آهن استفاده می‌شود [۱۸ و ۳۳]. در این روش ابتدا مخلوط اولیه از آهن و آلومینیم با نسبت مناسب تهیه می‌شوند و در شکل‌های هندسی ساده، فشرده می‌شوند. واکنش تشکیل آلومیناید به دو صورت

می تواند انجام شود. در روش اول مخلوط فشرده توسط یک منبع خارجی از یک سمت انرژی داده می شود تا واکنش شروع شود. در ادامه به دلیل گرمازا بودن واکنش تشکیل آلومیناید آهن، واکنش به صورت خود به خود و موجی پیش می رود تا به انتهای قطعه برسد. این روش به عنوان روش موجی پیش رونده نیز نامیده می شود. در حالت دیگر که به واکنش انفجاری موسوم است نمونه درون یک کوره قرار می گیرد و کل جسم تا دمایی که برای شروع واکنش تشکیل آلومیناید لازم است گرم می شود، آنگاه واکنش به صورت هم زمان در کل جسم انجام می شود. مشکل روش سنتز خود انتشاری دمای بالا، عدم کنترل دقیق بر فرآیند و تخلخل قطعه تولیدی می باشد.

انجماد سریع روش دیگری است که در تولید آلومینایدهای آهن استفاده می شود. روش های مختلف انجماد سریع شامل چرخاندن مذاب^۱، استخراج از مذاب^۲ (تولید نوار)، اتمیزه گازی^۳ و الکتروود چرخان^۴ (تولید پودر) برای تولید آلومینایدهای آهن قابل به کارگیری می باشند. این روش به دلیل توانایی در ایجاد ساختار ریز امیدواری هایی در افزایش انعطاف پذیری در ترکیبات بین فلزی ایجاد کرده است [۳۴ و ۳۵]. محصول تولیدی در این روش به صورت پودر یا نوار است. در شکل ۱-۴ تعدادی از روش های تولید پودر و نوار که در انجماد سریع استفاده می شوند ارائه شده است [۳۴ و ۳۵].

جلوگیری از رشد دانه ها در طی فرآیند ثانویه تولید قطعه می باشد. در صورت رشد دانه، مزیت فرآیند انجماد سریع کاهش می یابد. در فرآیند تولید قطعه از پودر تولیدی به روش انجماد

۱-Melt Spinning

۲-Melt Extraction

۳-Gas Atomizing

۴- Rotating Electrode

۵- Hot Isostatic Press

۶-Ceramic Consolidation