

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی



IMAM KHOMEINI  
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

دانشکده فنی و مهندسی

## ساخت کامپوزیت زمینه آلومنیومی تقویت شده با ذرات

### با ساختار فازی MAX و بررسی خواص آن

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد

گرایش شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

نگارش:

رضوان واحد

استاد راهنما:

دکتر آرمان صدقی

بهمن ۱۳۹۱

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مواد

## ساخت کامپوزیت زمینه آلومنیومی تقویت شده با ذرات

### با ساختار فازی MAX و بررسی خواص آن

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد

گرایش شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

نگارش:

رضوان واحد

استاد راهنما:

دکتر آرمان صدقی

استاد مشاور:

دکتر احمد رزاقیان آرانی

بهمن ۱۳۹۱

## چکیده:

هدف از انجام این پژوهش، ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات با ساختار فاز MAX و بررسی خواص فیزیکی آن بود. در این راستا، ماده با ساختار فاز MAX با نام  $Ti_3AlC_2$  که از ترکیب پودری  $2TiC/Al/Ti$  به روش سنتز احتراقی خودپیش‌رونده دما بالا فعال‌شونده با آسیاب-کاری مکانیکی تحت اتمسفر خنثی (آرگون) در دمای  $1550^\circ C$  و مدت زمان  $2/5hr$  تولید شد. به منظور بررسی از آنالیزهای حرارتی (DTA)، تفرق سنجی اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد.

سپس، کامپوزیت‌های  $Ti_3AlC_2-Al$  و  $TiC-Al$  به وسیله‌ی روش پرس گرم ساخته شد. خواص مکانیکی و ساختاری ارزیابی شد و نیز چگالی، سختی، استحکام فشاری و مقاومت به سایش نمونه‌ها اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شد.

نتایج نشان دادند که، سنتز  $Ti_3AlC_2$  از سیستم پودری  $2TiC/Al/Ti$  به‌علت ظرفیت حرارتی کم با خلوص بالا امکان‌پذیر است. آسیاب‌کاری، سیستم پودری برای عملیات سنتز احتراقی خودپیش‌رونده دما بالا را بهتر راه‌اندازی کرد و همچنین مشاهدات آزمایشگاهی نشان دادند که رفتار احتراقی واکنش‌دهنده‌ها با حضور  $TiC$  به‌عنوان یکی از اجزای آنها بسیار متفاوت بود و کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  خواص پایاپایی با کامپوزیت  $TiC-Al$  داشت، اما بسیار بهتر از آلومینیوم تقویت نشده بود.

۱	مقدمه	
۴	مروری بر منابع مطالعاتی	۱
۴	۱-۱ معرفی وانواع کلی مواد با ساختار فازی MAX	
۴	۱-۱-۱ تبیین مفهوم مواد با ساختار فازی MAX	
۵	۱-۱-۲ تاریخچه	
۶	۱-۱-۳ شیمی ساختاری	
۹	۱-۱-۴ خواص مکانیکی	
۱۱	۱-۱-۴-۱ باندهای کینک	
۱۳	۱-۱-۵ ضعف مواد با ساختار فازی MAX	
۱۳	۱-۱-۶ علت خواص منحصر به فرد فازهای سه گانه ی مواد با ساختار فازی MAX	
۱۴	۱-۱-۷ مکانیسم تغییر شکل	
۱۷	۱-۱-۸ روش های تولید مواد با ساختاری فازی MAX	
۱۸	۱-۱-۹ کاربردهای مواد با ساختاری فازی MAX	
۲۱	۲-۱ کامپوزیت های با ساختار فازی MAX	
۲۱	۱-۲-۱ تعریف کلی کامپوزیت	
۲۲	۲-۲-۱ انواع کامپوزیت ها	
۲۳	۳-۲-۱ کامپوزیت های زمینه فلزی	
۲۴	۴-۲-۱ کامپوزیت های زمینه آلومینیومی	
۲۵	۵-۲-۱ تقویت کننده ها	
۲۶	۶-۲-۱ تقویت کننده های زمینه ی آلومینیوم	
۲۸	۷-۲-۱ روش های تولید کامپوزیت های زمینه فلزی	
۲۹	۸-۲-۱ انواع روش های تهیه کامپوزیت زمینه Al	
۲۹	۱-۸-۲-۱ فرآیندهای حالت مایع	
۲۹	۱-۸-۲-۱ ریخته گری تحت فشار	
۳۰	۲-۸-۲-۱ ریخته گری گردابی	
۳۱	۳-۸-۲-۱ تزریق مذاب	
۳۱	۴-۸-۲-۱ پاشش همزمان	
۳۲	۲-۸-۲-۱ فرآیندهای حالت جامد	

۳۲	۱-۲-۸-۲-۱ اتصال دیفیوژیونی
۳۳	۲-۲-۸-۲-۱ متالورژی پودر
۳۴	۳-۲-۸-۲-۱ تف جوشی توسط مایکروویو
۳۵	<b>۳-۱ <math>Ti_3AlC_2</math> و کامپوزیت های آن</b>
۳۵	۱-۳-۱ ترکیبات TACs
۳۷	۱-۱-۳-۱ روش ساخت $Ti_3AlC_2$
۳۷	۱-۱-۳-۱ سنتز احتراقی خود پیشرونده ی دما بالا
۳۸	۲-۱-۳-۱ روش احتراق (CS)
۳۹	۳-۱-۳-۱ احتراق خودپیشرونده ی دما بالای فعال شونده با آسیاب کاری (MASHS)
۴۰	۲-۱-۳-۱ دلایل استفاده از مواد با ساختاری فازی MAX به عنوان تقویت کننده کامپوزیت های زمینه فلزی
۴۰	۳-۱-۳-۱ کامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات با ساختار فازی MAX
۴۴	۴-۱-۳-۱ ساخت کامپوزیت آلومینیومی تقویت شده با ذرات $Ti_3AlC_2$
۴۹	<b>۲ فعالیت های تجربی</b>
۴۹	<b>۱-۲ مواد اولیه</b>
۵۰	۲-۲ تجهیزات مورد استفاده
۵۰	۱-۲-۲ ترازوی دیجیتالی
۵۰	۲-۲-۲ آسیاب ماهوارهای
۵۰	۳-۲-۲ دستگاه پرس
۵۱	۴-۲-۲ اجاق مایکروویو
۵۱	۵-۲-۲ کوره اتمسفر خنثی
۵۱	۶-۲-۲ تجهیزات متالوگرافی
۵۱	<b>۳-۲ روش پژوهش</b>
۵۲	۱-۳-۲ ساخت $Ti_3AlC_2$
۵۳	۲-۳-۲ ساخت نمونه های کامپوزیتی
۵۴	<b>۴-۲ روش های شناسایی و اندازه گیری خواص</b>
۵۴	۱-۴-۲ آنالیز حرارتی
۵۴	۲-۴-۲ پراش پرتو ایکس

۵۵	۳-۴-۲ بررسی مورفولوژی توسط میکروسکوپ الکترونی SEM
۵۵	۴-۴-۲ ارزیابی دانسیته نمونه های تف جوشی شده
۵۶	۵-۴-۲ آزمون سختی
۵۶	۶-۴-۲ آزمون فشار
۵۶	۷-۴-۲ آزمون سایش

## ۳ نتایج و بحث ۶۰

۶۰	۱-۳ نتایج حاصل از ساخت $Ti_3AlC_2$
۶۰	۱-۱-۳ بررسی آنالیز حرارتی (DTA)
۶۱	۲-۱-۳ بررسی ترکیبات متفاوت در ساخت $Ti_3AlC_2$
۶۳	۳-۱-۳ بررسی پراش پرتو ایکس (XRD)
۶۵	۴-۱-۳ اثر دمای نگهداری و زمان نگهداری بر ساخت $Ti_3AlC_2$
۶۸	۵-۱-۳ مکانیسم واکنش در دو سیستم پودری $2TiC/Al/Ti$ و $3Ti/Al/2C$
۷۰	۱-۵-۱-۳ مکانیسم واکنش برای سنتز $Ti_3AlC_2$ در ترکیب $2TiC/Al/Ti$
۷۱	۲-۵-۱-۳ مکانیسم واکنش برای سنتز $Ti_3AlC_2$ در ترکیب $3Ti/Al/2C$
۷۳	۶-۱-۳ بررسی های ریز ساختاری

## ۳-۲ نتایج حاصل از ساخت کامپوزیتها ۸۰

۸۰	۱-۲-۳ اندازه گیری دانسیته و درصد تخلخل
۸۲	۲-۲-۳ بررسی واکنش بین $Ti_3AlC_2$ و آلومینیوم در محدوده دمای $500-1000^\circ C$
۸۳	۳-۲-۳ اندازه گیری و بررسی سختی نمونه های کامپوزیتی
۸۴	۴-۲-۳ نتایج حاصل از آزمون استحکام فشاری
۸۶	۵-۲-۳ بررسی های ریزساختاری
۹۲	۶-۲-۳ خواص سایشی
۹۲	۱-۶-۲-۳ بررسی کمی خواص سایشی
۹۸	۲-۶-۲-۳ بررسی کیفی رفتار سایشی

## ۴ نتایج و پیشنهادها ۱۰۳

۱۰۳	۱-۴ نتیجه گیری
۱۰۵	۲-۴ پیشنهادها





صفحه	عنوان	فهرست جدول‌ها
۸	جدول ۱-۱: دسته‌بندی ترکیبات شناخته شده بر اساس ساختار شیمیایی.	
۲۵	جدول ۲-۱: مقایسه مزایا و معایب زمینه آلومینیومی با دیگر کامپوزیت‌ها.	
۲۶	جدول ۳-۱: برخی تقویت‌کننده‌های مهم مورد استفاده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی.	
۳۶	جدول ۴-۱: ویژگی‌های $Ti_3AlC_2$ .	
۴۹	جدول ۱-۲: مواد اولیه مصرفی در تولید $Ti_3AlC_2$ .	
۴۹	جدول ۲-۲: مواد اولیه مصرفی در تولید کامپوزیت‌ها.	
۵۳	جدول ۳-۲: شرایط عملی آسیاب‌کاری سیستم‌های پودری در ساخت $Ti_3AlC_2$ .	
۵۴	جدول ۴-۲: شرایط عملی آسیاب‌کاری سیستم‌های پودری کامپوزیتی.	
۵۴	جدول ۵-۲: شرایط پرس گرم نمونه‌های پودری.	
۵۷	جدول ۶-۲: شرایط آزمایش سایش.	
۶۳	جدول ۱-۳: دسته‌بندی دو سیستم پودری $TiC/Al/Ti$ و $Ti/Al/C$ و شرایط عملی انجام تف‌جوشی.	
۶۶	جدول ۲-۳: داده‌های حاصل از الگوی XRD ( $2\theta$ بر حسب شدت نسبی) برای مواد $Ti_2AlC$ ، $Ti_3AlC_2$ و $TiC$ .	
	جدول ۳-۳: نتایج به دست آمده از چگالی و تخلخل نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با نمونه‌های بدون تقویت‌کننده.	
۸۰		
۸۳	جدول ۴-۳: نتایج اندازه‌گیری سختی کامپوزیت‌ها با درصد‌های مختلف وزنی از تقویت‌کننده‌ها.	

- شکل ۱-۱: مثال‌هایی از جامدهای لایه‌ای. الف) گرافیت، ب) میکا و پ) یخ. ۴
- شکل ۲-۱: موقعیت مواد با ساختار فازی MAX در جدول تناوبی مندلیف. ۵
- شکل ۳-۱: ساختار کریستالی سه گروه مواد با ساختار فازی MAX. الف) فاز ۲۱۱، ب) فاز ۳۱۲ و پ) فاز ۴۱۳. ۷
- شکل ۴-۱: الف) یک ریزنگار از نمونه  $Ti_3SiC_2$  تغییرشکل یافته در دمای بسیار بالا، ب) شمایی از لایه‌ای بودن ساختار کاربیدهای سه گانه. ۸
- شکل ۵-۱: نمایش توانایی تحمل آسیب. مکانیسم‌های لایه‌های تحت بار، الف) مشابه ورق خمیری، ب) لایه‌های خم شده، پ) حین اعمال فرورنده مکانیکی و ت) بشکته‌ای شدن. ۱۰
- شکل ۶-۱: مقایسه‌ی  $Ti_3SiC_2$  با سایر مواد مهندسی. ۱۱
- شکل ۷-۱: ورقه‌ای شدن و تشکیل باند کینک بر صفحات لغزشی به موازات سطح در سطح قطعه‌ای با ساختار فازی MAX. ۱۲
- شکل ۸-۱: پدیده‌ی تشکیل باندهای کینک در یک دسته‌ی کارت معمولی. ۱۲
- شکل ۹-۱: الف) ترتیب قرارگرفتن دیواره‌های نابجایی‌ها، ب) بشکته‌ای شدن الاستیک، پ) هسته‌زنی جفت نابجایی‌ها و ت) تشکیل مرزهای کینک. ۱۴
- شکل ۱۰-۱: الف) یک استوانه با مقطع بیضی، ب) تشکیل یک باند کینک اولیه، پ) نمایش سه‌بعدی دو جفت از نابجایی در یک دیوار، ت) متلاشی نشدن باند کینک اولیه، ث) تکثیر منطقه تجمع نابجایی، ج) مشابه ت و چ) ورقه‌ای شدن دانه‌ها. ۱۶
- شکل ۱۱-۱: تغییر شکل در بلورک‌ها مشابه ایجاد چین و شکن در فرش. الف) ایجاد، ب، پ و ت) حرکت و ث) بازساخت. ۱۷
- شکل ۱۲-۱: تصویر حاصل از ریزنگار الکترونی عبوری تحت حرکت نابجایی لبه‌ای. ۱۷
- شکل ۱۳-۱: دسته‌بندی روش‌های تولید مواد با ساختار فازی MAX. ۱۸
- شکل ۱۴-۱: الف) و ب) استفاده از مواد با ساختار فازی MAX در پوشش‌ها به‌عنوان جایگزین طلا. ۱۹
- شکل ۱۵-۱: استفاده از مواد با ساختار فازی MAX در پوشش‌های محافظ دما به‌عنوان لایه‌ی میانجی. ۲۰
- شکل ۱۶-۱: قسمت‌های مختلف دماغه‌ی هواپیما نیازمند جنسی با قابلیت تحمل دماهای بسیار زیاد. ۲۰
- شکل ۱۷-۱: نمودار دسته‌بندی کامپوزیت‌ها بر اساس شکل تقویت‌کننده. ۲۳
- شکل ۱۸-۱: انواع مختلف کامپوزیت‌های زمینه فلزی. ۲۴
- شکل ۱۹-۱: مقایسه تاثیر ذرات آلومینا و کاربید سیلیسیوم بر استحکام نهایی آلومینیوم. ۲۷
- شکل ۲۰-۱: تاثیر مقدار فاز دوم بر استحکام نهایی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی. ۲۷
- شکل ۲۱-۱: درصد ازدیاد طول بر حسب درصد حجمی ذرات تقویت‌کننده. ۲۸
- شکل ۲۲-۱: روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی. ۲۹
- شکل ۲۳-۱: تصویر شماتیک از روش ریخته‌گری تحت فشار. ۳۰
- شکل ۲۴-۱: تصویر شماتیک از روش ریخته‌گری گردابی. ۳۰
- شکل ۲۵-۱: تصویر شماتیک از روش تزریق مذاب. ۳۱

- شکل ۱-۲۶: تصویر شماتیک از روش پاشش همزمان. ۳۱
- شکل ۱-۲۷: فرآیند اتصال دیفیوژیونی. ۳۲
- شکل ۱-۲۸: شماتیک فرآیند متالورژی پودر. ۳۴
- شکل ۱-۲۹: مقایسه روند گرم شدن نمونه در روش‌های الف) مایکروویو و ب) کوره معمولی. ۳۴
- شکل ۱-۳۰: تصویر ضبط شده از احتراق جبهه واکنش خود متکثر را در تولید  $Ti_3AlC_2$ . ۳۹
- شکل ۱-۳۱: الف) منحنی تنش- کرنش در جامدهای KNE، ب) حلقه‌های تشکیل نایجابی موازی و چندگانه. ۴۲
- شکل ۱-۳۲: روند آسیب دیدن نمونه کامپوزیت زمینه فلزی در حین بارگذاری کششی یا فشاری. ۴۶
- شکل ۱-۳۳: نمودار تنش-کرنش فشاری کامپوزیت  $40Ti_3AlC_2-Al$  از دمای اتاق (RT) تا دمای  $475^\circ C$ . ۴۶
- شکل ۲-۱: شماتیکی از قالب فولادی پرس سرد و گرم. ۵۱
- شکل ۲-۲: شماتیک مراحل انجام شده در بخش اول پژوهش. ۵۲
- شکل ۲-۳: شماتیک مراحل انجام شده در بخش دوم پژوهش. ۵۲
- شکل ۲-۴: تصاویر شماتیک از روش‌های مختلف آزمایش سایش، الف) نمونه بر دیسک، ب) نمونه بر صفحه. ۵۷
- شکل ۳-۱: نمودار آنالیز حرارتی سیستم پودری با ترکیب  $3Ti/Al/2C$ . ۶۱
- شکل ۳-۲: نمودار آنالیز حرارتی سیستم پودری با ترکیب  $2TiC/Al/Ti$ . ۶۱
- شکل ۳-۳: الگوی XRD نمونه‌های سیستم پودری  $2TiC/Al/Ti$  در کوره‌ی دما بالا تحت اتمسفر خنثی (آرگون) (S1) و در ماکروویو (S2). ۶۴
- شکل ۳-۴: الگوی XRD نمونه‌های سیستم پودری  $3Ti/Al/2C$  در کوره‌ی دما بالا تحت اتمسفر خنثی (آرگون) (S3) و در ماکروویو (S4). ۶۴
- شکل ۳-۵: اثر دما و زمان نگهداری بر سیستم پودری  $2TiC/Al/Ti$  در کوره‌ی معمولی دما بالای تحت اتمسفر خنثی (آرگون). ۶۷
- شکل ۳-۶: اثر دما و زمان نگهداری بر سیستم پودری  $3Ti/Al/2C$  در کوره‌ی معمولی دما بالای تحت اتمسفر خنثی (آرگون). ۶۷
- شکل ۳-۷: اثر زمان نگهداری بر سیستم پودری  $3Ti/Al/2C$  در کوره‌ی معمولی دما بالای تحت اتمسفر خنثی (آرگون) در دمای  $1500^\circ C$ . ۶۸
- شکل ۳-۸: واحدهای شبکه الف)  $Ti_2AlC$ ، ب)  $Ti_3AlC_2$ . ۶۹
- شکل ۳-۹: مکانیسم امکانپذیر برای تولید  $Ti_3AlC_2$  در سیستم پودری  $2TiC/Al/Ti$ . ۷۱
- شکل ۳-۱۰: مکانیسم واکنشی تشکیل  $Ti_3AlC_2$  در حین فرآیند احتراقی در سیستم پودری  $3Ti/Al/2C$ . الف) پودرهای واکنش دهنده، ب) پیدایش مذاب Ti-Al و لایه‌های  $TiC_x$ ، پ) تشکیل هسته‌های  $TiC_x$  درون مذاب Ti-Al و ت) حل شدن یکسری هسته‌های  $TiC_x$  درون مذاب Ti-Al و شروع تشکیل لایه‌های  $Ti_3AlC_2$  از مذاب و رشد یکسری هم به صورت بلورهای گرد  $TiC$  به صورت به دام افتاده در مذاب. ۷۲
- شکل ۳-۱۱: ناحیه همدمای دیاگرام فازی Ti-Al-C در دمای  $1300^\circ C$ . ۷۳
- شکل ۳-۱۲: الف) مورفولوژی  $Ti_3AlC_2$ ، ب) بسته شدن ترک به وسیله‌ی دانه‌ها و پ) لایه‌ای بودن دانه‌های

شکل ۳-۱۳: شماتیک الف) رشد لایه‌ای در هنگام تشکیل  $Ti_3AlC_2$ ، ب) رشد دوبعدی لایه‌ها، پ) ساختار تراس شکل.

۷۵

شکل ۳-۱۴: مورفولوژی پس از سینتر در دمای  $1500^\circ C$  در ترکیب الف)  $2TiC/Al/Ti$  و ب)  $3Ti/Al/2C$

شکل ۳-۱۵: آنالیز EDS از نقطه‌ی A مربوط به مخلوط پودری  $2TiC/Al/Ti$  در تصویر الف شکل ۳-۱۴.

۷۷

شکل ۳-۱۶: آنالیز EDS از نقطه‌ی B مربوط به مخلوط پودری  $3Ti/Al/2C$  در تصویر ب شکل ۳-۱۴.

۷۸

شکل ۳-۱۷: مقایسه سینتر ترکیب پودری  $3Ti/Al/2C$  در ماکروویو و کوره معمولی تحت اتمسفر خنثی. الف) مدت  $2hr$  دمای  $1500$ ، ب) مدت  $6hr$  دمای  $1500$  و پ) ماکروویو به مدت  $5min$ .

۷۹

شکل ۳-۱۸: مراحل تفجوشی ذرات در پرس گرم. الف) جاری شدن و آرایش مجدد ذرات، ب) تغییر فرم ذرات، پ) متراکم شدن ذرات.

۸۱

شکل ۳-۱۹: مقایسه‌ی نتایج چگالی تئوری و ظاهری کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  با مقادیر  $5$ ،  $10$ ،  $15$  و  $20$  درصد وزنی از فاز تقویت‌کننده.

۸۱

شکل ۳-۲۰: مقایسه نتایج چگالی تئوری و ظاهری کامپوزیت  $TiC-Al$  با مقادیر  $5$ ،  $10$ ،  $15$  و  $20$  درصد وزنی از فاز تقویت‌کننده.

۸۲

شکل ۳-۲۱: تغییرات سختی کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  و  $TiC-Al$  در مقایسه با آلومینیوم خالص آسیاب‌کاری نشده.

۸۳

شکل ۳-۲۲: تغییرات استحکام فشاری کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  و  $TiC-Al$  با آلومینیوم خالص آسیاب‌کاری نشده.

شکل ۳-۲۳: تصاویر ساختار سطحی از سطح نمونه‌های تفجوشی شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الکترون‌های برگشتی (Back Scattered)، الف) آلومینیوم و کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  با  $5$ ، پ)

۸۷

$10$ ، ت)  $15$  و ث)  $20$  درصد وزنی تقویت‌کننده.

شکل ۳-۲۴: تصاویر ساختار سطحی از سطح نمونه‌های تفجوشی شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الکترون‌های برگشتی (Back Scattered)، الف) آلومینیوم و کامپوزیت  $TiC-Al$  با  $5$ ، پ)  $10$ ،

۸۸

ت)  $15$  و ث)  $20$  درصد وزنی تقویت‌کننده.

شکل ۳-۲۵: تصاویر ساختار سطحی از سطح نمونه‌های تفجوشی شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الکترون‌های ثانویه (Secondary Electrons)، الف) آلومینیوم و کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  با  $5$ ،

۸۹

پ)  $10$ ، ت)  $15$  و ث)  $20$  درصد وزنی تقویت‌کننده.

شکل ۳-۲۶: تصاویر ساختار سطحی از سطح نمونه‌های تفجوشی شده کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الکترون‌های ثانویه (Secondary Electrons) از نحوه‌ی اتصال دانه‌های

$Ti_3AlC_2$  با زمینه‌ی آلومینیومی الف) انتخاب یک دانه، ب) مناطق پل زدگی، پ) بزرگنمایی مناطق پل

۹۰

زدگی.

شکل ۳-۲۷: تصاویر ساختار سطحی از سطح نمونه‌های تفجوشی شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الکترون‌های ثانویه (Secondary Electrons)، الف) آلومینیوم و کامپوزیت  $TiC-Al$  با  $5$ ، پ)

- ۱۰، ت) ۱۵ و ث) ۲۰ درصد وزنی تقویت کننده. ۹۱
- شکل ۳-۲۸: نمودار میزان کاهش وزن بر حسب مسافت کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  و آلومینیوم خالص آسیاب کاری نشده، در دمای  $25^{\circ}C$ ، تحت بار  $21/6N$ . ۹۳
- شکل ۳-۲۹: نمودار میزان کاهش وزن بر حسب مسافت کامپوزیت  $TiC-Al$  و آلومینیوم خالص آسیاب کاری نشده، در دمای  $25^{\circ}C$ ، تحت بار  $21/6N$ . ۹۳
- شکل ۳-۳۰: نمودار میزان کاهش وزن کل بر حسب مسافت کل ( $1000m$ ) کامپوزیت با آلومینیوم خالص آسیاب کاری نشده، در دمای  $25^{\circ}C$ ، تحت بار  $21/6N$ . ۹۴
- شکل ۳-۳۱: نمودار نرخ سایش بر حسب میزان فاز تقویت کننده کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  و  $TiC-Al$  با آلومینیوم خالص آسیاب کاری نشده، در دمای  $25^{\circ}C$ ، تحت بار  $21/6N$ . ۹۴
- شکل ۳-۳۲: نمودار ستونی نرخ سایش بر حسب میزان فاز تقویت کننده کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  و  $TiC-Al$  با آلومینیوم خالص آسیاب کاری نشده، در دمای  $25^{\circ}C$ ، تحت بار  $21/6N$ . ۹۵
- شکل ۳-۳۳: نمودار تغییرات ضریب اصطکاک کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  در درصدهای وزنی مختلف: الف) ۰، ب) ۵، پ) ۱۰، ت) ۱۵ و ث) ۲۰ درصد وزنی تحت بار  $21/6N$  در دمای  $25^{\circ}C$ . ۹۶
- شکل ۳-۳۴: نمودار تغییرات ضریب اصطکاک کامپوزیت  $TiC-Al$  در درصدهای وزنی مختلف: الف) ۰، ب) ۵، پ) ۱۰، ت) ۱۵ و ث) ۲۰ درصد وزنی تحت بار  $21/6N$  در دمای  $25^{\circ}C$ . ۹۷
- شکل ۳-۳۵: نمودار ستونی مقایسه‌ی مقادیر میانگین ضریب اصطکاک کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  با مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ درصد وزنی تقویت کننده با آلومینیوم تقویت نشده. ۹۸
- شکل ۳-۳۶: نمودار ستونی مقایسه‌ی مقادیر میانگین ضریب اصطکاک کامپوزیت  $TiC-Al$  با مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ درصد وزنی تقویت کننده با آلومینیوم تقویت نشده. ۹۸
- شکل ۳-۳۷: تصاویر ساختار سطحی از سطح نمونه‌های تحت سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الکترون‌های ثانویه (Secondary Electrons)، الف) آلومینیوم و کامپوزیت  $Ti_3AlC_2-Al$  با درصد تقویت کننده: ب) ۵، پ) ۱۰، ت) ۱۵ و ث) ۲۰ در دمای اتاق و نیروی  $21/6N$ . ۱۰۰
- شکل ۳-۳۸: تصاویر ساختار سطحی از سطح نمونه‌های تحت سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الکترون‌های ثانویه (Secondary Electrons)، الف) آلومینیوم و کامپوزیت  $TiC-Al$  با درصد تقویت کننده: ب) ۵، پ) ۱۰، ت) ۱۵ و ث) ۲۰ در دمای اتاق و نیروی  $21/6N$ . ۱۰۱

## مقدمه:

کاربیدهای سه‌گانه  $Ti_3AlC_2$ ، یکی از اعضای ترکیبات با ساختار فازی MAX<sup>۱</sup> با فرمول عمومی  $M_{n+1}AX_n$  ( $n=۱-۳$ ) هستند، به طوری که M فلزات انتقالی اولیه، A عناصر گروه A (از IIIA تا VIA) و X کربن یا نیتروژن است. این فازها با ساختار هگزاگونال، شامل صفحه‌های اکتاهدرال با لبه‌های مشترک ( $M_6X$ ) است که به وسیله‌ی صفحه‌های A از هم جدا شده‌اند. مواد با ساختار فازی MAX به‌عنوان مواد نانولایه‌ای پایدار شناخته می‌شوند و نیز شامل یک دسته خواص مهم که ناشی از ساختار نانولایه‌ای آنها از طریق پیوندهای کوالانت قوی M-X که با لایه‌هایی از A با پیوندهای M-A ضعیف از هم جدا شده‌اند، می‌باشد [۱].

$Ti_3AlC_2$  در دمای اتاق دارای سختی بالا و صلبیت<sup>۲</sup> است. استحکام بالا در دمای بالا، مقاومت به شوک حرارتی و اکسیداسیون، هدایت حرارتی بالا و همچنین وزن پایین و قابلیت ماشین‌کاری از دیگر خواص آن به‌شمار می‌رود. این خواص منحصر به‌فرد، امکان استفاده از این مواد، در ترکیبات ساختاری و کاربردی دما بالا، پوشش‌های مقاوم به اکسیداسیون و سطوح آلیاژی، سرامیک‌های هادی در محیط‌های مستعد به محیط‌های خورنده و همچنین به عنوان تقویت‌کننده برای فلزات نرم از جمله آلومینیوم و مس در کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی را ممکن می‌سازد. به‌علاوه، استفاده بیش‌تر از این مواد، نیازمند مجموعه‌ای از خواص است که نمی‌توان به تنهایی با یک ماده به دست آورد؛ اما کامپوزیت‌ها، به طراحی مواد جدید متشکل از حداقل دو ماده، که هر کدام دارای یکی از خواص مورد نیاز است، نزدیک شده‌اند [۱].

کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی<sup>۳</sup> (MMC) بر پایه آلومینیوم، پتانسیل زیادی برای کاربرد در بخش حمل و نقل دارند. این مواد کامپوزیتی نیاز به کاهش وزن را برطرف کرده و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم را بهبود می‌بخشد. زمینه‌ی آلومینیومی دارای مزیت‌هایی چون دانسیته کم، چقرمگی و مقاومت به آسیب است، درحالی‌که ذرات تقویت‌کننده استحکام، صلبیت و مقاومت به سایش را افزایش می‌دهند. کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی همچنین دارای موقعیت اجتناب‌ناپذیری در صنعت هستند، به طوری‌که کامپوزیت‌های زمینه‌ی آلومینیوم تقویت شده با ذرات سخت SiC و  $Al_2O_3$  سهم عمده‌ای از آن را بر دوش می‌کشند. تردی، عملیات ماشین‌کاری پایین و میل طبیعی به شوک حرارتی، فقدان قابلیت تحمل آسیب و واکنش‌پذیری با مذاب آلومینیوم به‌عنوان موانع

<sup>1</sup> MAX Phases

<sup>2</sup> Stiffness

<sup>3</sup> Metal Matrix Composites

اصلی در استفاده از SiC در مذاب آلومینیوم است. به‌طور کلی وابستگی زیاد آلومینیوم به سیلیسیوم و انحلال‌پذیری سیلیسیوم در آلومینیوم موجب تجزیه سیلیسیوم در مذاب آلومینیوم می‌شود [۱].

بنابراین، ترکیب مجموعه خواص منحصر‌بفرد مواد با ساختار MAX به صورت کامپوزیت در زمینه‌ی آلومینیومی می‌تواند بسیار جالب و مورد بحث باشد.

در برآورده کردن نیاز پیوسته برای بهبود کارایی مواد شامل سبکی، صلبیت و بالابودن استحکام، تلاش‌های زیادی انجام گرفته است. یکی از موفق‌ترین روش‌ها، تولید کامپوزیت است، به‌گونه‌ای که فعالیت‌های بی‌شماری بر ساخت مواد با قابلیت استفاده در کاربردهای ساختاری انجام شده است. قبل از اینکه کاری از حالت بالقوه به حالت بالفعل درآید، نیازمند این است که مطالعات گسترده‌ای روی آن موضوع به‌عمل آید. انجام پژوهش فقط به معنی ایجاد ماده جدید و یافتن کاربردهای آن نیست و امکان دستیابی به ماده با خواص نامطلوب وجود دارد، اما مطالعه‌ی این امور منجر به افزایش آگاهی از رفتار این دسته جدید از مواد کامپوزیتی شده که بدون شک خاستگاه سیل کثیری از افراد از جمله اساتید دانشگاهی، هیئت‌های علمی، صنایع و تکنولوژی است.

در پژوهش حاضر، ساخت کامپوزیت با زمینه آلومینیومی و انتخاب دیگری از ذرات تقویت‌کننده با به‌کارگیری از فواید  $Ti_3AlC_2$  به‌عنوان یکی از کاربردهای سه‌گانه با ساختار فازی MAX بیان می‌شود. کاربرد سه‌گانه  $Ti_3AlC_2$ ، به‌عنوان فاز تقویت‌کننده از آن جهت به‌کار برده می‌شود که دارای دانسیته کم، مدول بالا، هدایت حرارتی و خواص خود روان‌کاری خوب است؛ به‌علاوه با اتصال ذراتی چون  $Ti_3AlC_2$  و  $Ti_3SiC_2$  درون آلومینیوم، خواص مکانیکی این ساختارها به میزان قابل ملاحظه‌ای بهبود یابد.

# فصل اول

## مروری بر منابع مطالعاتی



# ۱ مروری بر منابع مطالعاتی

## ۱-۱ معرفی وانواع کلی مواد با ساختار فازی MAX

### ۱-۱-۱ تبیین مفهوم مواد با ساختار فازی MAX

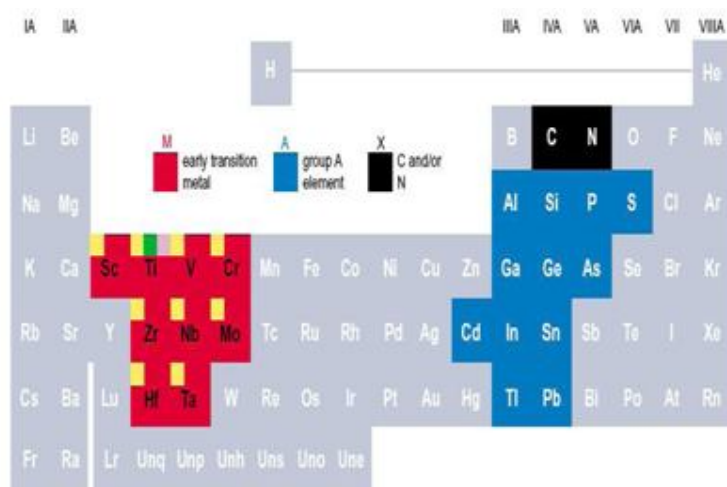
ترکیبات جامد لایه‌ای در طبیعت و پیرامون ما فراوانند، به‌عنوان مثال سنگ‌ها، جامدهای شیشه‌ای و معدنی، یخ، گرافیت، ابر رساناهای لایه‌ای، نیتrideها و کاربیدهای لایه‌ای سه‌گانه که با نام مواد با ساختار فازی MAX شناخته می‌شوند و غیره، فقط مثال‌های کوچکی از این گروه بزرگ هستند [۲].

موادی همچون گرافیت و دیگر مواد مهندسی لایه‌ای جهان پیرامون ما را شکل داده‌اند، به طوری که از ساختمان‌های بنا شده روی زمین تا مواد مورد استفاده در کاربردهای تکنولوژیکی را در بر می‌گیرد [۲]. جامدهای لایه‌ای چون یخ، گرافیت و مواد معدنی لایه‌ای، مانند میکا را که آنیزوتروپ نیز هستند (شکل ۱-۱)، اگرچه در زمینه‌های مختلفی چون زمین‌شناسی، مهندسی و در مواردی فیزیک نیز بررسی شده، اما اغلب به‌طور منحصربفرد و در یک گروه مجزا مورد مطالعه قرار می‌گیرند [۲].



شکل ۱-۱: مثال‌هایی از جامدهای لایه‌ای. الف) گرافیت، ب) میکا و پ) یخ [۲].

ترکیبات بین‌فلزی با ساختار فازی  $MAX^1$ ، دسته‌ای جدید از جامدها و ترکیبات سه‌گانه‌ای از کاربیدها و نیتريد‌ها با فرمول کلی  $M_{n+1}AX_n$  هستند به طوری که  $n=1-3$ ، M فلزات انتقالی اولیه مثل (Zr, Ti, Hf)، عناصر گروه A اغلب IIIA و IVA مثل (Ge, Si, Al) و X نیتروژن یا کربن است (شکل ۱-۲). این ترکیبات شامل یک سری خواص غیر معمول هستند به این صورت که از یک-سو مشابه فلزات عمل کرده و قابلیت ماشین کاری و هدایت الکتریکی و حرارتی دارند و از طرف دیگر به علت صلبیت<sup>۲</sup>، مقاومت به اکسید شدن، پایداری حرارتی و نقطه ذوب بالای آن مشابه سرامیک‌ها عمل می‌کنند. این ویژگی‌ها توجه صنعت را به این مواد جلب کرده است [۲،۳،۴،۵].



شکل ۱-۲: موقعیت مواد با ساختار فازی MAX در جدول تناوبی مندلیف [۳،۴،۵].

این مواد به دلیل مدول الاستیک عجیب و شگفت‌آورشان، پلاستیسیته‌ی برگشت‌پذیر و قابلیت ماشین‌کاری، مواد مناسبی جهت کاربردهای صنعتی هستند. علت این خواص منحصربفرد اساساً ناشی از نوع پیوند خاص آن یعنی ترکیبی از پیوندهای فلزی و سرامیکی و قابلیت تغییرشکل به علت ساختار کریستالی لایه‌ای آن است [۳،۴،۵].

### ۲-۱-۱ تاریخچه

در اوایل دهه‌ی ۶۰، آقایان بنسووسکی<sup>۳</sup>، جتسکو<sup>۴</sup> و نوتنی<sup>۵</sup> کارشان را روی زمینه‌ای از شیمی ساختاری که سیستم سه‌گانه‌ای جدید را بر پایه‌ی فلزات انتقالی اولیه بنا می‌کرد، شروع کردند. در

<sup>1</sup> MAX Phases

<sup>2</sup> Stiffness

<sup>3</sup> Benesovsky

<sup>4</sup> Jeitscho

<sup>5</sup> Nowotny

میان آن ترکیبها تقریباً ۴۰ ترکیب کاربردی پیچیده وجود داشت که به طور اختصار Hagg و یا H-Phases نام‌گذاری کردند.

اما طولی نکشید که H-Phases به فراموشی سپرده شد. تقریباً ۳۰ سال بعد، پرفسور بارسم<sup>۱</sup> روی این مواد تمرکز کرد، ایشان به‌همراهی گروه تحقیقاتی‌اش به این دست از مواد که قابلیت ماشین‌کاری داشتند، جانی تازه بخشید و بیش از ۴۰۰ مقاله در مورد کاربردها و نیتريد‌های سه-گانه در علوم طبیعی، علمی و فیزیکی منتشر کرد. در این زمان این مواد با نام مواد با ساختار فازی MAX و با فرمول کلی  $M_{n+1}AX_n$  به جامعه علمی معرفی شد به‌طوری که  $n=1-3$ ، M نشان-دهنده‌ی فلزات انتقالی اولیه مثل (Zr, Ti, Hf)، A عناصر گروه اول مثل (Ge, Si, Al) و X نیتروژن یا کربن است [۳،۵،۶].

نام‌گذاری جدید زمانی در نظر گرفته شد که در کنار ساختار  $M_2AC$  با استکیومتری (۲۱۱)، ساختاری مشابه با آن، یعنی  $M_3AC_2$  با استکیومتری (۳۱۲) مثل  $Ti_3SiC_2$  و استکیومتری (۴۱۳) مثل  $Ti_4AlN_3$  نیز دیده شد اما خواص قابل مقایسه‌ای را با هم نشان می‌دادند؛ امروزه بیش از ۶۰ نوع از این مواد شناخته شده است [۳،۴،۵].

### ۳-۱-۱ شیمی ساختاری

دسته‌بندی مواد با ساختار فازی MAX می‌تواند به ۳ گروه بر پایه تعداد اتم‌های عناصر M، A و X در هر مولکول تقسیم شود. همان‌طور که از فرمول کلی آن مشخص است سه فاز اصلی را تشکیل می‌دهند:

۲۱۱، ۳۱۲ و ۴۱۳ (شکل ۳-۱) [۲،۴،۵].

الف) ۲۱۱ یا همان  $M_2AC$  که به دو گروه قابل تقسیم است [۲،۳،۴،۶]:

- پیوند M-X

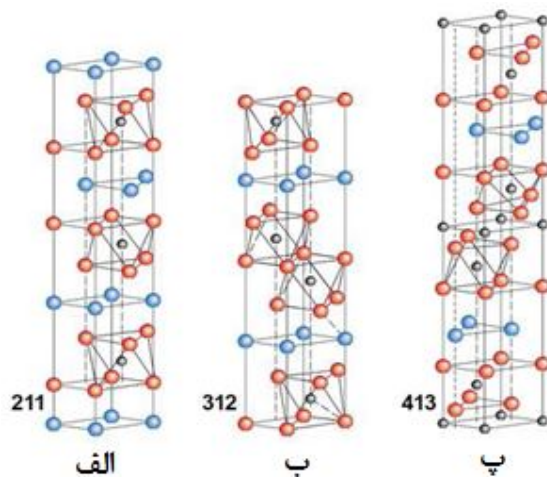
- پیوند M-A

لازم به ذکر است که، پیوند M-X سطح انرژی بالاتری نسبت به پیوند M-A دارد.

ب) ۳۱۲ یا همان  $M_3AC_2$  که معروف‌ترین نوع این فاز  $Ti_3SiC_2$  است، که در سال ۱۹۶۷ به وسیله‌ی جتسکو و نوتنی در حین واکنش بین  $TiH_2$ ، Si و گرافیت در  $2000^\circ C$  به دست آمد. اما بعدها دکتر بارسم به همراه همکاران‌اش توانستند قطعاتی از این ماده با خلوص بالا را به وسیله‌ی پرس گرم پودرهای Ti، SiC و گرافیت در  $1600^\circ C$  به دست آورند.

<sup>1</sup> M. Barsoum

پ) ۴۱۳ یا همان فاز  $M_4AC_3$  است، بر این گروه کارهای اندکی انجام یافته است و ترکیبات محدودی از این دسته یافت می‌شوند.



شکل ۳-۱: ساختار کریستالی سه گروه مواد با ساختار فازی MAX. الف) فاز ۲۱۱، ب) فاز ۳۱۲ و پ) فاز ۴۱۳ [۲،۳،۴،۵].

این مواد فقط از طریق نحوه‌ی چینش شناخته می‌شوند بدین معنی که ساختار را با تعداد لایه‌های اوکتاهدرال  $M_6C$  که توسط لایه‌های A جدا می‌شود، مشخص می‌کنند.

شیمی سطح و بلوری ترکیبات با ساختار فازی MAX شامل  $n=1$  به وسیله اسپکتروسکوپی فتوالکترون اشعه‌ی ایکس (X) مورد بررسی قرار گرفته است؛ بررسی‌ها نشان می‌دهند که اجزای سازنده به وسیله انرژی پیوندشان مشخص می‌شوند. کربن شامل کمترین حد انرژی برای کاربیدهاست. جزء M مثل Hf، Nb، V و Ti انرژی پیوندی برابر یا زیر حالت فلزی عناصرشان را دارا هستند. انرژی پیوند جزء A مثل Al، As، Ge و In از حالت عنصری آن کاملاً مجزا و زیر حالت عنصریشان و برابر با  $0.5-2$  الکترون ولت است. این مواد همچنین از طریق ترد و سخت بودن ترکیبات M-X و پیوند نسبتاً ضعیف با M-A متمایز می‌شوند.

در این مواد در میان لایه‌های  $M_{n+1}X_n$  لایه‌هایی از شبکه هگزاگونال خالص از عناصر گروه A قرار گرفته که در اثر روشی که تغییر شکل می‌یابند به پلی کریستال‌های نانولایه‌ای نیز معروفند. شکل ۴-۱، لایه لایه بودن مواد با ساختار فازی MAX که ناشی از طراحی طبیعی این مواد است و موجب استحکام و چقرمگی آنها می‌شود، نمایش می‌دهد. لایه‌های ماده با ساختار MAX، چقرمگی شکست حدود ۳۰۰۰ برابر بیشتر از مواد فقط کریستالی را نشان می‌دهند [۳].