

# مروری بر خواص، فرآوری تولید و کاربردهای مکس فازهای نانولایه‌ای

مرتضی قدیمی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا بهاروندی<sup>۲</sup>، احمدعلی آماده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی متالورژی و مواد، پردیس البرز، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> استاد مهندسی متالورژی و مواد، پردیس البرز، دانشگاه تهران

\*مسئول مکاتبات: mortezaghadimi@ut.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

مکس فاز  
سرامیک فلزی  
نانولایه  
مکانیسم تولید  
کاربردهای فناوریانه

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۹/۲۰

تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۳/۳۰

مکس فازها؛ نسلی جدید از مواد پیشرفته مهندسی و برخوردار از ترکیبی از خواص توامان فلزی و سرامیکی می‌باشند. این دسته از مواد با دارا بودن ساختار ذاتی نانولایه‌ای، قابلیت بهره‌مندی از رفتار فلزات و آلیاژها نظیر انعطاف پذیری و چقرمگی مناسب، به همراه سودجستن از رفتار سرامیک‌ها همچون مقاومت سایشی و اکسایشی خوب را برخوردار می‌باشند. مجموعه خواص بسیار عالی، چگالی نسبتاً کم و قابلیت ماشین‌کاری بالا، این ترکیبات را به یکی از مواد مهم و استراتژیک در صنایع مدرن و حساس کشورهای پیشرفته تبدیل کرده است. در این پژوهش تحقیقاتی کوشیده شده است تا این مواد نوین مورد شناسایی و معرفی واقع شده و دلایل چرایی خواص منحصر بفرد آن‌ها مورد ارزیابی واقع گردد. مکانیسم‌های فرآوری پاره‌ای از مهم‌ترین ترکیبات این مواد مورد مطالعه واقع گردیده و بهینه‌ترین روش‌های سنتز مورد ارزیابی قرار گرفته است. هم‌چنین مهم‌ترین کاربردهای این ترکیبات در سه حوزه فناوری‌های با تکنولوژی پیشرفته شامل حوزه‌های فضایی و کاربردی دمای بالا؛ محیط‌های تریبولوژیکی و صنایع هسته‌ای مورد بررسی واقع گردیده است.

## ۱ مقدمه

چقرمگی بالا، و ویژگی‌های سرامیکی مانند مدول بالا و مقاومت سایشی، دانسیته پایین و مقاومت خوب در برابر خوردگی و اکسیداسیون هستند. این بدان معنا است که این دسته از مواد نه تنها خواص سرامیک‌ها، بلکه برخی از خواص مفید و خوب فلزات را نیز در ترکیب خود دارند [۱-۴].

به نظر می‌رسد قابلیت ماشین‌کاری مکس فازها مهم‌ترین خاصیت تکنولوژیکی این مواد دستکم از نقطه نظر فناوریانه می‌باشد که یک مزیت غیرقابل انکار را برای مکس فازها در مقایسه با دیگر مواد با قابلیت کار در دمای بالا (به عنوان مثال، سوپر آلیاژها که ماشین‌کاری آن‌ها سخت و گران قیمت است و یا سرامیک‌ها که قابلیت ماشین‌کاری سخت‌تر و گران‌تری را دارند) فراهم می‌کند. درحالی‌که مکس فازها به راحتی ماشین‌کاری می‌شوند و حتی می‌توان آن‌ها را با اهر آهن بر دستی برید. مثلاً مکس فازهای پایه تیتانیوم را می‌توان آسیاب کرد و با دریل و با سرعت بالا و بدون استفاده از خنک‌کننده و روانکار سوراخکاری نمود. این قابلیت ماشین‌کاری در درجه اول ساخت نمونه‌های اولیه را نسبتاً ارزان می‌سازد، که به نوبه خود بدین معنی است که می‌توان ماده را برای هر کاربردی آزمایش کرد، هم‌چنین می‌توان به تکرارهای ابعادی خیلی دقیق پس از مراحل ماشین‌کاری رسید، که این موضوع اغلب در مواقعی که به تکرارهای ابعادی خیلی دقیق بعد از ساخت نیاز است کاربرد دارد.

در عین حال با توجه به آنکه اتصال سرامیک‌ها به مواد دیگر به ویژه از طریق فرآیندهای جوشکاری و یا لحیم‌کاری مشکل است؛ قابلیت ماشین‌کاری راه حل‌های جایگزین جدیدی را برای سرامیک‌های متداول که امکان اتصال به هم را ندارند فراهم می‌سازد [۵-۸].

امروزه یکی از چالش‌های موجود در صنایع مختلفی مانند نظامی، فضایی، هسته‌ای و اتومبیل‌سازی؛ دستیابی به موادی با دمای کاری بالا و در عین حال سبک است. مواد فلزی دارای خواص بسیار مناسبی مانند هدایت الکتریکی و هدایت حرارتی خوب، قابلیت تغییر شکل مومسان در دمای اتاق، قابلیت ماشین‌کاری و مقاومت به شوک‌های حرارتی هستند. در دماهای بالا، بیشتر آلیاژهای فلزی دیرگداز در معرض اکسیداسیون قرار گرفته و تضعیف شده و برای بارگذاری نامناسب می‌شوند. از این رو به منظور چیرگی بر محدودیت‌های دمای، مواد سرامیکی دیرگداز توسعه یافته‌اند.

سرامیک‌ها دارای خواص منحصر به فردی به‌مانند استحکام بالا، مدول کشسان بالا، پایداری دمایی مناسب و مقاومت به اکسیداسیون مناسب هستند.

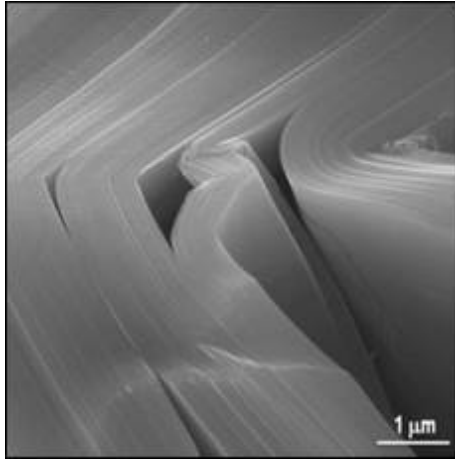
بیشتر سرامیک‌ها سخت و شکننده هستند. هم‌چنین سرامیک‌ها مستعد به واقع شدن در شرایط شوک حرارتی هستند؛ به عبارت دیگر تغییرات دمایی سریع می‌تواند منجر به تولید ترک‌های مخرب در این گروه از مواد شود.

پژوهش‌های دانشمندان و محققین در سال‌های اخیر؛ منجر به کشف گروه جدیدی از مواد مهندسی پیشرفته موسوم به مکس فازها<sup>۱</sup> شده است. مکس فازها که با عنوان سرامیک‌های فلزی نیز معرفی می‌شوند، نانو لمینت‌های پایدار ترمودینامیکی و در زمره سرامیک‌های سه جزئی لایه‌ای به شمار رفته و دارای رفتارهای دوگانه‌ای از خواص فلزات و سرامیک‌ها هستند. این گروه از مواد دارای ترکیبی از ویژگی‌های فلزی مانند انعطاف پذیری و

<sup>1</sup>MAX-phase

## ۲ معرفی و مشخصه یابی خواص مکس فازها

نانومتر می‌باشد. به سخن دیگر؛ نانولمینت‌های پایدار ترمودینامیکی به موادی که به طور طبیعی و بدون استفاده از ابزارهای طراحی به شکل نانولمینت ساخته می‌شوند، اطلاق می‌شود. [۱۲-۱۴] در شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> از ساختار طبیعی نانولایه ای دفرمه شده مکس فاز پایه تیتانیم نشان داده شده است.



شکل ۲: ساختار نانولایه ای مکس فاز  $Ti_3SiC_2$  [۵]

به دلیل این خواص منحصر به فرد است که مکس فازها برای کاربردهای دما بالا، پوشش‌های محافظ، حسگر، سطوح با اصطکاک پایین، اتصالات الکتریکی، فیلم‌های تنظیم پذیر برای سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی و کاربردهای دیگر پیشنهاد گردیده‌اند [۱۱-۱۴].

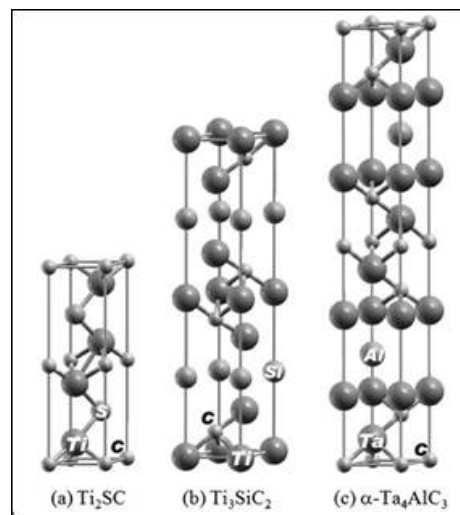
## ۳ مکانیسم تولید

جهت سنتز و ساخت مکس فازها می‌توان از روش‌های متنوعی بهره جست. اما با توجه به آن که فرآوری‌های تولید مکس فازها مستعد به ایجاد ترکیبات بین فلزی یا محلول‌هایی هستند که با پدیدایش خود منجر به کاهش خواص منحصر به فرد مکس فاز و دوری آن از برخورداری از ویژگی‌های منحصر به فرد خود می‌گردند؛ انتخاب مناسب‌ترین روش تولید و سپس بهینه یابی مکانیسم فرآوری حائز اهمیت خواهد بود. در این مطالعه؛ مکانیسم تولید مکس فاز کاربیدی پایه تیتانیم حاوی قلع مورد کاوش واقع می‌گردد.

ترکیب سه جزئی  $Ti_3SnC$  یکی از مهم‌ترین مکس فازها است. گروه فضایی آن به صورت  $P6_3/mmc$  و پارامترهای شبکه آن بر حسب نانومتر با دارا بودن هدایت الکتریکی بالای  $10^6 \times 14$ ؛ در عمل بیشترین مقدار هدایت الکتریکی در خانواده مکس فازها را دارا می‌باشد. از این رو به دلیل برخورداری از این خاصیت الکتریکی فوق العاده، تقویت کننده بسیار مناسبی برای پلیمرها، فلزات، سرامیک‌ها در کامپوزیت‌های الکتریکی به شمار می‌رود. هم چنین از پتانسیل و قابلیت خود روان کننده‌ای برخوردار می‌باشد. بنابراین با دارا بودن ترکیبی از خواص هدایت الکتریکی خوب، سختی پایین و خود روان کنندگی، گزینه‌ای امیدوار کننده به عنوان مواد جایگزین گرافیت برای کاربردهای گوناگون محسوب می‌شود [۱۵]. در شکل ۳، طرحواره ای از برخی خواص ساختاری این ماده ارائه شده است.

مکس فازها با فرمول عمومی  $M_{n+1}AX_n$  نشان داده می‌شوند. به سخن دیگر عبارت  $MAX$  خلاصه شده فرمول عمومی  $M_{n+1}AX_n$  می‌باشد. در فرمول عمومی  $M_{n+1}AX_n$ ، حرف  $M$  نشان دهنده یک فلز انتقالی می‌باشد. حرف  $A$  یک عنصر از گروه  $A$  را نشان می‌دهد و حرف  $X$  نشان دهنده کربن و یا نیتروژن است. مقدار اندیس  $n$  از یک تا سه متغیر می‌باشد و بسته به ترکیب، می‌تواند تغییر نماید. عناصر گروه  $A$ ، در ستون‌های سیزده تا شانزده جدول تناوبی وجود دارند. فلزات انتقالی در فازهای مکس که با حرف  $M$  نشان داده می‌شوند عبارتند از: اسکاندیم (Sc)، تیتانیم (Ti)، وانادیم (V)، کرم (Cr)، زیرکونیم (Zr)، نایوبیم (Nb)، مولیبدن (Mo)، هافنیم (Hf) و تانتالم (Ta) [۱، ۲]. عناصری که جایگزین حرف  $A$  در فرمول مکس فازها می‌شوند عبارتند از: آلومینیم (Al)، سیلیسیم (Si)، فسفر (P)، گوگرد (S)، گالیم (Ga)، ژرمانیم (Ge)، آرسنیک (As)، ایندیم (In)، قلع (Sn)، سرب (Pb) و تالیم (Tl) [۹-۱۱]. بسته به مقدار اندیس  $n$ ، فازهای مکس به سه مجموعه کلی تقسیم بندی می‌شوند. مجموعه دویست و یازده با فرمول عمومی  $M_2AX$  نشان داده می‌شود.

مجموعه سیصد و دوازده با فرمول عمومی  $M_3AX_2$  معرفی می‌گردند و در نهایت، مجموعه چهارصد و سیزده با فرمول عمومی  $M_4AX_3$  مشخص می‌شود. تفاوت اصلی ساختاری در فازهای اصلی این ترکیبات؛ در شمار لایه‌های  $M$  است که در بین دو لایه  $A$  قرار می‌گیرد. تنظیم و چیدمان اتمی، خواص متفاوتی را از فازهای مکس در سری‌های متفاوت، نتیجه می‌دهد [۹-۱۱]. در شکل ۱ چگونگی چینش لایه‌های اتمی در سه گونه پرکاربرد از مکس فازها به نمایش گذارده شده است.



شکل ۱: چگونگی چینش لایه‌های اتمی در سه گونه از مکس فازها [۳]

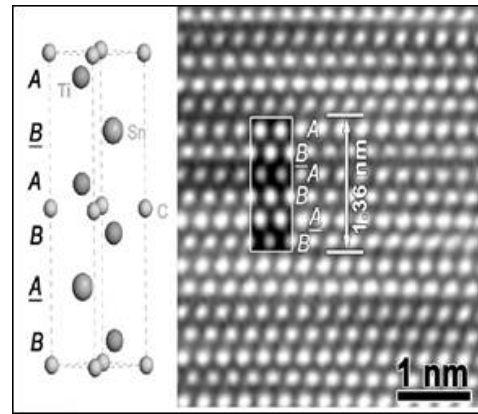
خواص شگفت آور مکس فازها از ساختار لایه ای فازهای مکس و ماهیت پیوندهای کووالانسی فلزی، که باندهای  $M-X$  در آن فوق العاده قوی و باندهای  $M-A$  نسبتاً ضعیف هستند، سرچشمه می‌گیرد. مکس فازها نانولمینت‌های<sup>۱</sup> پایدار ترمودینامیکی هستند. نانولمینت‌ها، موادی با ساختار چند لایه‌ای هستند که در آن ضخامت لایه‌های منفرد در محدوده

<sup>1</sup>Nano-laminate <sup>2</sup>Scanning Electron Microscopy (SEM)

TiC-Ti-Sn و یا Sn به عنوان ناخالصی های ناخواسته همواره همراه با  $Ti_7SnC$  وجود دارند. به خصوص با وجود کاربید تیتانیم هدایت الکتریکی و دیگر خواص  $Ti_7SnC$  از بین می رود. علاوه بر این در هنگام فرآیند سنتز  $Ti_7SnC$  از مخلوط کربن، قلع و تیتانیم همواره یک واکنش احتراقی بین کربن و تیتانیم وجود دارد. مقدار زیادی گرما مشابه با سنتز  $Ti_3AlC_2$  و  $Ti_3SiC_2$  با استفاده از پودرهای سیلیسیم و تیتانیم یا آلومینیم و کربن که در نتیجه منجر به نوسان دمایی شدید در سیستم می گردد آزاد می شود و در نهایت خلوص محصولات تحت تاثیر قرار می گیرد [۶].

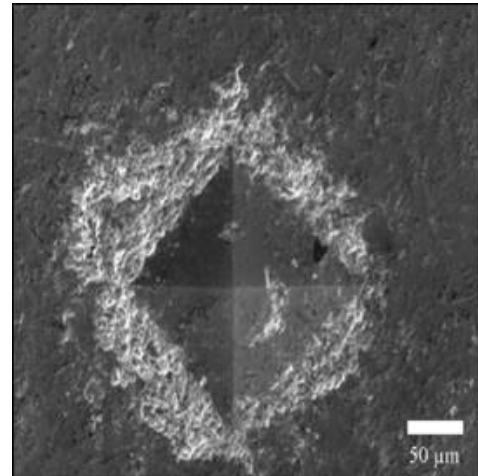
علاوه بر این، استفاده از فرآیند پرس داغ ایزواستاتیک و پرس داغ تک جهت یا دو جهت برای تولید  $Ti_7SnC$  خیلی گران و هزینه بر است. از این رو لازم است از یک مخلوط جدید و روش سینتر بدون فشار برای تهیه پودر  $Ti_7SnC$  در زمان نسبتاً کوتاه استفاده شود. بنابراین ژانگ<sup>۷</sup> و همکارانش از مخلوط جدید Ti/Sn/TiC برای سنتز  $Ti_7SnC$  با استفاده از روش سینتر بدون فشار بهره بردند [۱۰]. پودر TiC در مخلوط پودرهای اولیه به جای پودرهای تیتانیم و کربن، می تواند از بوجود آمدن واکنش احتراقی جلوگیری کند.

در فرآوری با روش سینتر بدون فشار از مخلوط پودرهای Ti (بامیانگین اندازه ۴۸ میکرومتر و خلوص بیشتر از ۹۹ درصد) و Sn (با میانگین اندازه ۷۵ میکرومتر و خلوص بالاتر از ۹۹ درصد) و TiC (با میانگین اندازه ذره ۴ میکرومتر و خلوص بیشتر از ۹۹ درصد) استفاده می شود. پودرهای تیتانیم، قلع و کاربید تیتانیم با نسبت های مولی (M1) 1:1:1 و (M2) 1:0/8:0/9 در شیشه ای از جنس پلی پروپیلین به مدت ۵ ساعت و به وسیله آسیاب گلوله ای با سرعت چرخش ۱۵۰ دور بر دقیقه با یکدیگر مخلوط شده و نسبت گلوله به پودر 2:1 گزنش می گردد. بعد از فرآیند آسیاب و گلوله پودرهای مخلوط شده درون یک قالب از جنس فولاد زنگ نزن ریخته و تحت فشار سرد ۲۰ مگاپاسکالی قرار داده می شوند. قطعه ای با قطر تقریبی ۲۰ میلی متر و به ارتفاع ۵ میلی متر تولید می شود، پودرهای فشرده شده درون یک بوته گرافیتی ریخته شده و سپس تحت شرایط سینتر بدون فشار در دماهای مختلف و زمان های در محدوده ۱۵ - ۳۰ دقیقه و تحت اتمسفر خلاء قرار داده می شود. نرخ حرارت دهی در دمای قبل ۴۵۰ درجه سانتی گراد برابر ۴۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه و سپس در دماهای پایانی برابر ۱۵ درجه سانتیگراد بر دقیقه تعیین می شود. با بررسی نتایج مشخص می شود که  $Ti_7SnC$  در دمای ۹۵۰ درجه سانتی گراد شروع به تشکیل شدن می کند. با این حال، کاربید تیتانیم و قلع همواره همراه با  $Ti_7SnC$  به عنوان محصول در طول فرآیند سینتر نمونه های با نسبت  $Ti:Sn:TiC=1:1:1$  و در محدوده ۱۰۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد وجود دارند. فاز مکس  $Ti_7SnC$  با خلوص بالا در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد و در مدت زمان ۱۵ دقیقه توسط سینتر نمونه با نسبت  $Ti:Sn:TiC=1:0/8:0/9$  به دست می آید. مکانیزم واکنش بین ذرات  $Ti_6Sn_5$  و TiC تشکیل  $Ti_7SnC$  را توصیف می کند. همانطور که مشخص است ترکیب پودرهای Ti/Sn/TiC را میتوان به عنوان یک مخلوط جدید برای سنتز  $Ti_7SnC$  و در مقیاس صنعتی و با استفاده از روش سینتر بدون فشار در نظر گرفت [۸].



شکل ۳: طرحواره خواص ساختاری مکس فاز  $Ti_7SnC$  [۱]

برای سنتز این ماده از روش های متنوعی همچون پرس ایزواستاتیک داغ<sup>۱</sup>، پرس داغ<sup>۲</sup> و سینتر بدون فشار<sup>۳</sup> استفاده شده است. بارسوم<sup>۴</sup> و همکارانش چندبلوری  $Ti_7SnC$  را با استفاده از روش پرس ایزواستاتیک داغ مخلوط پودرهای اولیه تیتانیم، قلع و گرافیت در محدوده دمای ۱۳۲۵ - ۱۲۵۰ درجه سانتی گراد و در مدت زمان ۴ تا ۱۰ ساعت و تحت فشار ۵۰ تا ۷۰ مگاپاسکال سنتز کردند. سختی ماده سنتز شده که با روش میکروویکرز اندازه گیری شده است به میزان پایین ۳/۵ گیگا پاسکال بوده است [۱]. شکل ۴ نمای میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح پولیش خورده این ماده و اثری که از اعمال فشار ۲۰ کیلوگرمی در مدت ۱۵ ثانیه ایجاد شده است را به نمایش می گذارد.

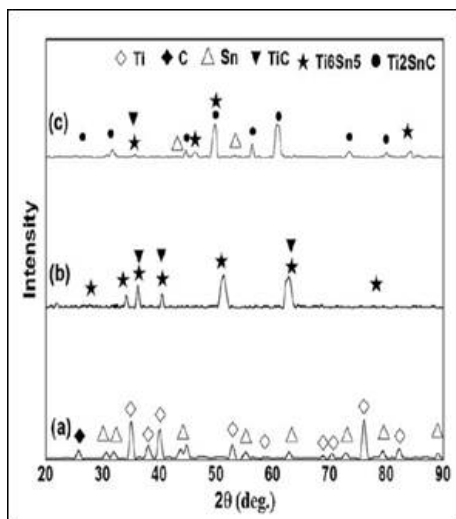


شکل ۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی برگشتی از سطح پولیش خورده  $Ti_7SnC$  همراه با نمایش اثر فرورونده [۱]

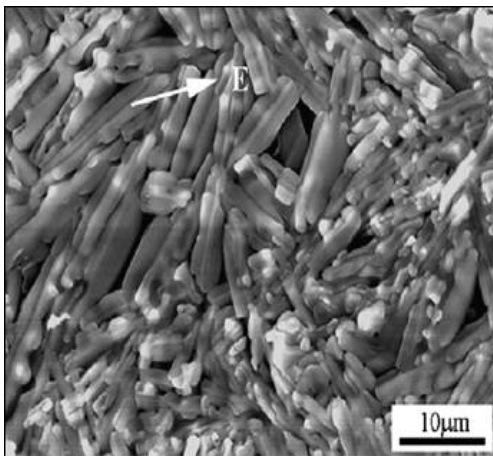
چو<sup>۵</sup> و همکارانش؛ ترکیب  $Ti_7SnC$  بالک را با استفاده از روش پرس داغ پودرهای تیتانیم، قلع و گرافیت در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی گراد و در مدت زمان ۲ ساعت و تحت فشار ۳۰ مگا پاسکالی تولید کردند. آنها همچنین پودر  $Ti_7SnC$  را توسط سینتر بدون فشار پودرهای تیتانیم، قلع و گرافیت در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد و در مدت زمان ۲ ساعت و تحت اتمسفر آرگون ساختند [۲-۴]. وینسنت<sup>۶</sup> و همکارانش پودر  $Ti_7SnC$  را بوسیله سینتر بدون فشار پودرهای تیتانیم، قلع و گرافیت در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد و در مدت زمان ۱ تا ۶ ساعت و در اتمسفر آرگون سنتز کردند. در این شرایط؛ پودر  $Ti_7SnC$  با خلوص بالا به سختی به دست می آید، چرا که ترکیبات

<sup>1</sup>Hot Isostatic Pressing (HIP) <sup>2</sup>Hot Pressing (HP) <sup>3</sup>Pressureless Sintering <sup>4</sup>Barsoum <sup>5</sup>Zhou <sup>6</sup>Vincent <sup>7</sup>Zhang

توان بالا و الکترودها در باتری و سلول‌های سوخت را دارا است.



شکل ۵: طرحواره پراش اشعه ایکس مکس فاز  $Ti_2SnC$  پس از فشردن و سینتر در دماهای (a): محیط، (b):  $600^\circ C$ : (c):  $1200^\circ C$  درجه سانتی‌گراد [۲]



شکل ۶: تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی مکس فاز  $Ti_2SnC$ . ساختار نانولایه ای در شکل مشخص گردیده است [۲]

خواص منحصر به فرد  $Ti_2AlC$  آن را به عنوان یک ماده جذاب برای کاربردهای سازه‌ای دما بالا و پوشش‌های مقاوم در برابر اکسیداسیون بر سطوح آلیاژها و نیز به عنوان یک سرامیک هادی مطرح می‌نماید. در بین مکس فازهای شناخته شده:  $Ti_2AlC$  و  $Ti_3AlC_2$  سبک وزن و مقاوم در برابر اکسیداسیون هستند. مکس فازهای  $Ti_2AlC$  و  $Ti_3AlC_2$  و  $Ti_3SiC_2$  می‌توانند در سیستم‌های مرتبط با انرژی که تحت فشار بالای محلول آبی و در دماهای بالا هستند استفاده شوند. با توجه به توان ترموالکتریکی نزدیک به صفر  $Ti_3SiC_2$  و  $Ti_3GeC_2$  پیشنهاد می‌شود که این ترکیبات می‌توانند به عنوان الکترودها هنگام اندازه‌گیری توان الکتریکی دیگر مواد مفید باشند. مکس فازهای سنتز شده با واکنش‌های حالت جامد یا رسوب-کندوپاش<sup>۲</sup> به طور بالقوه می‌توانند به عنوان الکترودها در وسایل نیمه هادی پایه  $GaN$ ،  $AlN$ ،  $SiC$  و کاربردهای حسگری استفاده شوند. فازهای مکس  $Cr_2GeC$  و  $Cr_2AlC$  بیشترین ضریب انبساط حرارتی را دارا می‌باشند، از این رو از آن‌ها برای پوشش دادن سطوح روی فولادها استفاده می‌گردد [۱-۶].

لی<sup>۱</sup> و تیم تحقیقاتی وی سنتز  $Ti_2SnC$  را با استفاده از روش سنتز خود احتراقی دما بالا<sup>۲</sup> و با بهره‌گیری از پودرهای تیتانیم، قلع و کربن بررسی کرده‌اند. آنها پودرهای تجاری تیتانیم (با خلوص ۹۹/۵ درصد و اندازه ۱۵ میکرومتر) و قلع (با خلوص ۹۹ درصد و اندازه ۲۹ میکرومتر) و کربن (با خلوص ۹۹/۹ درصد و اندازه ۳۸ میکرومتر) و با نسبت اتمی  $Ti:Sn:C=2:1:1$  با یکدیگر مخلوط کردند. سپس پودرها با دانسیته نسبی ۷۰ درصد و قطعه با قطر ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر فشرده شده و سپس پودر فشرده شده درون یک محفظه واکنش قرار داده شده و توسط یک منبع حرارتی شعله‌ور گردیده است. اولین واکنش در دمای ۲۳۲ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد و در دماهای بالاتر از این دما قلع ذوب می‌شود و تحت این شرایط اتم‌های قلع براحتی به سمت سطح کربن و تیتانیم نفوذ می‌کنند و در اطراف آنها تجمع می‌کنند و یک چارچوب سفت را تشکیل می‌دهند. در  $Ti_6Sn_5$  تشکیل می‌شود. در مرحله بعد  $Ti_6Sn_5$  به تدریج در خارج از مایع اشباع شده  $Ti-Sn$  رسوب می‌کند. در این شرایط اثری از  $Sn - Ti_6Sn_5$  در منطقه واکنش مشاهده نگردیده است. با افزایش دمای سیستم مقدار تیتانیم و کربن در مذاب  $Sn$  افزایش می‌یابد. هنگامی که  $Ti$  اطراف ذرات  $C$  به یک غلظت معین برسد، دانه‌های  $TiC$  در اطراف مناطق خالی اشباع شده  $TiC$  رسوب می‌کند. بدین ترتیب فازهای  $Ti_6Sn_5$  و  $TiC$  در خارج محلول مذاب  $Sn-C-Ti$  اشباع شده رسوب می‌کند. در دمای  $1200^\circ C$  درجه سانتی‌گراد  $Ti_2SnC$  در محلول شروع به تشکیل شدن می‌کند. در دماهای بالاتر از  $1250^\circ C$  درجه سانتی‌گراد  $Ti_2SnC$  به  $TiC$ ،  $Sn$  تجزیه می‌شود [۲]. طرحواره پراش اشعه ایکس مربوط به مراحل مختلف سنتز ترکیب فوق در شکل ۵ و تصویر میکروسکوپ الکترونی مکس فاز سنتز شده در شکل ۶ نشان داده شده است.

## ۴ کاربردهای مکس فازها

### ۱.۴ کاربردهای الکتریکی و فضایی

با توجه به وجود خواص ترکیبی و تلفیقی از فلز و سرامیک در مکس فازها، کاربردهای زیادی برای آنها پیشنهاد شده است: مکس فازهای در شکل بالک برای سازه‌های دما بالا، یاتاقان-های چرخشی، المنت‌های حرارتی، نازل‌ها، مبدل‌های حرارتی، و ابزارهای مقاوم به ضربه پیشنهاد می‌شود. مکس فازهای در شکل فیلم‌های نازک برای سطوح با اصطکاک پایین و اتصالات الکتریکی حسگرها برای سیستم‌های میکروالکترومکانیکی مورد استفاده واقع می‌گردند. بر اساس محاسبات نظری و تابع دی-الکتریک و شدت نشر مادون قرمز پیشنهاد شده است که  $Ti_4AlN_3$  و  $V_4AlC_3$  پتانسیل استفاده بعنوان پوششی برای فضاپیماها برای جلوگیری از حرارت خورشید و همچنین افزایش سردکننده تابشی در ماموریت‌های فضایی آینده را دارا هستند. به تازگی یک پوشش نانو کامپوزیت بر اساس سیستم  $Ti-Si-C$  به بازار عرضه شده که در کاربردهای اتصالات الکتریکی جریان اصلی در صنعت ارتباطات از راه دور تجاری سازی شده است و پتانسیل استفاده‌های افزون‌تر از قبیل وسایل

<sup>1</sup>Li <sup>2</sup>Self-propagating High Temperature Sintering (SHS) <sup>3</sup>Sputtering



## ۲.۴ کاربردهای تریبولوژیکی

نازل-های مکس فازها، این مواد می‌توانند جایگزین خوبی برای نازل-های فولادی به شمار روند. کاربردهای دما بالا ممکن است مربوط به کاربردهای الکتریکی باشند. برای مثال اولین استفاده تجاری از  $Ti_3SiC_2$  به عنوان هدف کندوپاش برای رسوب اتصال الکتریکی<sup>۳</sup> بوده است. همچنین الکترودهای تولید الکتروشیمی کلر نیز مورد مطالعه واقع شده است [۱].

## ۴.۴ کاربردهای هسته‌ای

بسیاری از نیروگاه‌های هسته‌ای نسل جدید طراحی شده به موادی نیاز دارند که بتوان از آنها در دماهای نزدیک به ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در محیط‌های نوترون سریع<sup>۴</sup> استفاده کرد. با توجه به خواص مکانیکی و قابلیت ساخت مکس فازها، این مواد گزینه خوبی برای راکتورهای هسته‌ای پیشرفته و کاربردهای سازه‌ای دما بالا و پوشش سوخت هستند [۱]. خواص مکانیکی و حرارتی استثنایی  $Ti_2AlN$  توجهات زیادی را برای استفاده بعنوان مواد سازنده در راکتورهای اتمی جلب کرده است. اخیرا امکان استفاده از  $Ti_3SiC_2$  بعنوان ماده پوششی مقاوم در برابر تشعشعات در صنعت هسته‌ای و بعنوان یک ماده محافظ در برابر تداخل امواج الکترومغناطیس پیشنهاد شده است. محاسبات فعال سازی نشان می‌دهد که مکس فازها در اکتیویته کل بعد از حدود ۶۰ سال پرتوگیری و یک دوره فروپاشی چند ساله شبیه به  $SiC$  می‌باشند. به ویژه این مواد در معرض طیف نوترونی راکتور حرارتی و سریع برای ۱۰، ۳۰، ۶۰ سال پرتوگیری قرار می‌گیرند. اکتیویته‌های ویژه  $Ti_3SiC_2$ ،  $Ti_2AlC$ ،  $Ti_3AlC_2$  با آلیاژ ۶۱۷ مورد مقایسه واقع شده است. نتایج مشخص ساخته است که اکتیویته این مکس فازها به میزان سه برابر کمتر از آلیاژ ۶۱۷ می‌باشد [۲].

## ۵ نتیجه‌گیری

ترکیبات نانولایه‌ای مکس فاز به دلیل برخورداری از خواص تلفیقی فلزات و سرامیک‌ها؛ از خواص متمایز و منحصر به فردی در مقایسه با بسیاری از مواد متداول مهندسی برخوردار می‌باشند. این موضوع باعث پیدایش جایگاهی ویژه به منظور استفاده از این ترکیبات در صنایع و تکنولوژی‌های فناورانه نظیر فضایی و هسته‌ای گردیده است. به منظور دستیابی به تمامی خواص مکس فازها؛ باید ضمن گزینش روش مناسب تولید، به گونه‌ای عمل نمود تا با بهینه سازی فرآوری تولید؛ بیشینه میزان مکس فاز با بالاترین درجه خلوص حصول گردد.

## مراجع

- [1] J. Ward, S. Middleburgh, M. Topping, A. Garner, P. Fer-  
ankel, Crystallographic evolution of MAX Phase in proton  
irradiation environments, Journal of Nuclear materials, Vol.  
502, No. 2, pp. 220-227, 2019.
- [2] Z. M, Sun, Progress in research and development on MAX  
phases: a family of layered ternary compounds, Interna-  
tional Materials Reviews, Vol. 56, No. 3, pp. 143-166, 2016.
- [3] T. Zhanga, H. Myounga, D. Shinc, K. H. Ki, Syntheses and

در حال حاضر یک نیاز بزرگ در صنایع مدرن برای سیستم‌های تریبولوژیکی برخوردار از نرخ‌های سایش و ضرایب اصطکاک کم در یک گستره دمایی گسترده می‌باشد. در دماهای بالاتر از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و خصوصا در محیط‌های اکسید کننده روانسازهای مرسوم مایع و بیشتر روانسازهای متداول جامد (مثلا گرافیت و  $MoS_2$ ) به سرعت از بین می‌روند. شمار زیادی از مواد جامد از قبیل فلزات نجیب (مانند طلا، نقره و پلاتین) و فلوراید‌های غیر آلی (مانند  $LiF$ ،  $CaF_2$ ،  $BaF_2$ ) و برخی اکسیدهای فلزی (مانند  $NiO$  و  $MoO_3$ ) بعنوان روان ساز جامد بکار برده می‌شود. اما به طور کلی این مواد تنها در محدوده دماهای محدود خواص روانساز خوب دارند و برخی به ویژه در دمای محیط بسیار ترد هستند. بنابراین برخی از مواد روانساز مقاومت به سایش ضعیفی از خود نشان می‌دهند و برخی قابلیت ماشین کاری ندارند. مکس فاز  $Ti_2SC$  بعنوان یک عنصر برش آزاد<sup>۱</sup> در فولادها، انگیزشی برای گسترش بیشتر چنین مکس فازی به جای سرب در فولادهای زنگ نزن برش آزاد و حتی در اکثر برنج‌ها می‌باشد تا اثرات مضر سرب بر محیط زیست را حذف کند. پروژه‌ای توسط اداره تحقیقات نیروی دریایی ایالات متحده انجام شده است که به تولید مواد پایه مکس فاز در یاتاقان‌های فویلی با اصطکاک و سایش کمی در بازه دمایی بین دمای اتاق تا ۸۲۳ کلوین منجر گشته است [۱-۶].

## ۳.۴ کاربردهای دمای بالا

مکس فاز  $Ti_2AlC$  یک گزینه مناسب برای اجزای سازنده سازه‌های دمایی که در معرض محیط‌های ساینده با دماهای بسیار بالا هستند، از قبیل دماغه کلاهک موشک، رادارها و نازل‌های موتورهای راکت و مشعل‌های گازی و سپرهای حرارتی در نیروگاه‌های هسته‌ای محسوب می‌شود [۱۴]. با توجه به هدایت الکتریکی خوب و خواص تریبولوژیکی به همراه خواص مکانیکی قابل قبول، مکس فازهایی از قبیل  $Ti_3SiC_2$  و  $Ti_3AlC_2$  عملکرد بهتری نسبت به پانتوگراف‌های<sup>۲</sup> پایه کربنی برای قطارهای الکتریکی از خود نشان می‌دهند [۴].

با توجه به مجموعه قابل توجهی از خواص که مکس فازها از خود نشان می‌دهند خصوصا پایداری در دماهای بالا، مقاومت در برابر شوک حرارتی، تحمل آسیب و قابلیت ماشینکاری خوب؛ تعجب آور نیست که در کاربردهای دما بالا بتوان از این فازها سود جست [۳]. به طور کلی پایداری حرارتی مکس فازها به عناصر سازنده‌شان، اتمسفر و فشار بخار آن‌ها بستگی دارد. اگرچه در هوا با افزایش دما اکسیداسیون افزایش می‌یابد؛ اما برخی از مکس فازها از قبیل  $Ti_2AlC$  و  $Ti_3SiC_2$  مقاومت به اکسیداسیون خوبی دارند زیرا لایه‌های اکسیدی حفاظتی تشکیل می‌دهند. از فاز مکس  $Ti_2AlC$  به عنوان امیدوار کننده ترین مکس فاز برای کاربردهای دما بالا نام برده شده است؛ زیرا از چگالی پایین، مقاومت به اکسیداسیون بسیار خوب و قابلیت ترمیم ترک برخوردار است. از این ماده هم چنین می‌توان در موتور توربین‌های گازی، مبدل‌های حرارتی، اتصالات الکتریکی و پوشش مواد استفاده کرد [۱۲-۱۴]. به علت قابلیت ماشین کاری بسیار خوب و توانایی شیاردار کردن

<sup>1</sup>Free-cutting element    <sup>2</sup>Pantographs    <sup>3</sup>Electrical contact deposition

<sup>4</sup>Fast-nutron

- properties of Ti<sub>2</sub>AlN MAX-phase films, *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol. 160, No. 1, pp. 149-153, 2015.
- [4] A. Nishad, K. Surendra, K. Saxenaa, B. Yingwei, J. Huc, Synthesis and structural stability of Ti<sub>2</sub>GeC, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 474, No. 8, PP. 174-179, 2013.
- [5] C. Hu, L. He, M. Liu, X. Wang, J. Wang, M. Li, Y. Bao, In Situ Reaction Synthesis and Mechanical Properties of V<sub>2</sub>AlC, *Journal of American Ceramics Society*, Vol. 91, No. 12, pp. 4029-4035, 2018.
- [6] C .L. Yeh, Y. G. Shen, Effects of using Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> as a reactant on formation of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> by combustion synthesis in SHS mode, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 473, No. 9, pp. 408-413, 2016.
- [7] A. sedghi1, R. vahed, A. Mashreghi, H. Olya, Synthesis of Ti<sub>2</sub>AlC and Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> MAX phases by Mechanically Activated Self-propagating High temperature Synthesis, *Materials and Design*, Vol. 414, No. 6, pp. 1-10, 2018.
- [8] L. Shannahal, M. W. Barsoum, M. Lamberson, Dynamic fracture behavior of a MAX Phase Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 169, No. 1, pp. 54-66, 2017.
- [9] B. Cui, Microstructural evolution during high-temperature oxidation of Ti<sub>2</sub>AlC ceramics, *Acta Materialia*, Vol. 59, No. 3, pp. 4116-4125, 2017.
- [10] C. L. Li, Improving Levine model for dielectric constants of transition metal compounds, *Journal of Application Physics*, Vol. 42, No. 3, pp. 75-84, 2016.
- [11] B. Cui, Microstructural evolution during high-temperature oxidation of spark plasma sintered Ti<sub>2</sub>AlN ceramics, *Acta Materialia*, Vol. 60, No. 2, pp. 1079-1092, 2012.
- [12] S. Cheristopolous, N. Kelaidis, A. Chroneos, Defect Processes of M<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> MAX Phase, *Solid State Communication*, Vol. 261, No. 7, pp. 54-56, 2017.
- [13] W. B. Zhu, L. Zhijun, Kinetics and Microstructure Evolution of Ti<sub>2</sub>SC during In Situ Synthesis Process, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 518, No. 13, pp. 1-12, 2013.
- [14] M. W. Barsoum, X. He, Ab initio calculations for properties of MAX phases Ti<sub>2</sub>InC, Zr<sub>2</sub>InC, and Hf<sub>2</sub>InC, *Solid State Communications*, Vol. 149, No. 13-14, pp 564-566, 2015.
- [15] T. Lapauw, A. K. Swarnakar, B. Tunca, K. Lambrinou, J. Vleugels, Nanolaminated ternary carbide (MAX Phase) materials for high temperature application, *International Journal of Refractory Matels and Hard Materials*, Vol. 72, No. 4, pp. 51-55, 2018.