

سورة



دانشکده فیزیک

گرایش فیزیک حالت جامد

پایان نامه کارشناسی ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

عنوان :

ساخت و بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پایه فلزی

فاطمه باقری

استاد راهنما :

دکتر حمید هراتی‌زاده

استاد مشاور:

دکتر مجتبی قطعی

بهمن ماه ۱۳۹۰



تقدیم بہ

پدر و مادر عزیزم

و برادر مہربانم مصطفیٰ

## تقدیر و سپاس‌گزاری

هماره در زندگی، انسان‌هایی در مسیر زندگی مان گام می‌نهند که، موهبتی الهی اند و با حضورشان برگی نو از دفتر زندگی مان را ورق می‌زنند. جناب آقای دکتر حمید هراتی زاده، از جمله اشخاصی اند که، در مرحله ای از زندگی ام (مقطع کارشناسی ارشد)، با حضور صمیمانه شان، نه تنها ره توشه‌هایی پر ثمر در کوله پستی علمی‌ام قرار دادند، بلکه با خصوصیات اخلاقی بی نظیرشان همچون دیگر خواهی، گشاده رویی، مهربانی، همیاری و ... تأثیر شگرفی بر اخلاق و نگرش من نسبت به اطرافیان گذاشتند. جناب آقای دکتر مجتبی قطعی، نیز بی دریغ، اندوخته‌های علمی‌شان را به من آموختند و با صبر و حوصله در تمامی این مسیر همراهی مان کردند.

هیچ کانون و محفلی را مقدس تر و با محبت تر از خانواده نیافتم. خانواده مهربان و دوست داشتنی ام، در هر لحظه از زندگی ام با مساعدت بی نظیر و حضور معنوی شان، امیدم را برای ادامه مسیر فزونی می‌بخشیدند.

در طی مسیر از محبت و همکاری دوستان عزیزم به طور چشمگیری بهره مند شدم. از این میان، به طور ویژه ای لطف و همکاری بی شائبه آقایان حامد آل ابراهیم، میلاد خاکزاد و جواد محمدیان شامل حال اینجانب شد.

در نهایت، از همکاری صمیمانه همگی تان با زبانی ساده و خالصانه تشکر می‌کنم و محبت‌های گرمی بخشتان را ارج می‌نهم.

## تعهد نامه

اینجانب **فاطمه باقری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک دانشکده فیزیک دانشگاه

صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "ساخت و بررسی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت های پایه فلزی"

تحت راهنمایی **جناب آقای دکتر حمید هراتی زاده** متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی، به دلیل سبکی، استحکام بالا، مدول بالا، ضریب انبساط گرمایی پایین و مقاومت سایشی خوب به عنوان یک گروه جدید از مواد پیشرفته به حساب می‌آیند.

هدف این پایان نامه سنتز و بررسی خواص مکانیکی (سختی) کامپوزیت و نانو کامپوزیت سه تایی  $Al/Al_2O_3p-SiC_p$  با استفاده از روش آسیاب کاری مکانیکی و روش تزریق پلیمری است. برای آنالیز ساختاری نمونه‌ها از پراش پرتو X و میکروسکوپ روبشی الکترونی و برای بررسی خواص مکانیکی نیز از دستگاه میکروسختی ویکرز استفاده شده است.

در این پروژه با استفاده از آسیاب سیاره‌ای پراورژی بعد از ۲۰ ساعت آسیاب کاری پودر کامپوزیتی  $Al/SiC$  میانگین اندازه ذرات به ۵۵ نانومتر رسید. نتایج سختی سنجی نمونه‌ها نشان می‌دهد، سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی به مراتب بهتر از نمونه‌های کامپوزیتی است، همچنین سختی نمونه نانو کامپوزیتی سه تایی  $Al/Al_2O_3p-SiC_p$  بیشتر از نمونه‌های دوتایی  $Al/SiC$  و  $Al/Al_2O_3$  است. سختی نانوکامپوزیت یکی از نتایج بسیار جالب این تحقیق سختی نانوکامپوزیت با نسبت وزنی یکسان  $Al_2O_3$  و  $SiC$  (هر کدام ۳/۵٪ وزنی) است که، سختی بالاتری نسبت به نمونه با ۱۵ درصد وزنی فاز سخت  $SiC$  دارد. در این حالت با وجود اینکه درصد فاز تقویت کننده در نمونه نانوکامپوزیت سه تایی، نصف کامپوزیت دوتایی  $Al/SiC$  است، ولی سختی نانو کامپوزیت سه تایی بالاتر است. بنابراین اضافه کردن ذرات با فاز سخت با اندازه نانومتری با وجود درصد فاز سخت کمتر باعث بهبود خواص مکانیکی شده است که، این امر باعث می‌شود، این نوع نانوکامپوزیت به علت درصد فاز سخت کمتر در سختی یکسان، چقرمگی شکست بالاتری داشته و امکان کاهش قیمت محصولات تولیدی را فراهم می‌کند.

**کلمات کلیدی:** نانو کامپوزیت زمینه آلومینیومی، آسیاب سیاره ای پراورژی، تزریق پلیمری

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

### مقالات ارائه شده

۱- کنفرانس انجمن فیزیک ایران سال ۹۰ با عنوان "طراحی و ساخت آسیاب سیاره ای جهت سنتز

نانوذرات فلز-سرامیکی"

۲- چهارمین کنفرانس بین المللی نانوساختارهای کیش با عنوان

“Investigation of Mechanical Properties of the Hybrid Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+SiC Nanocomposite

Prepared by Two Methods High Energy Ball Milling and Polymer Impregnation”

### مقالات پذیرفته شده

کنفرانس NANOSMAT ۲۰۱۱ لهستان با عنوان

“The Mechanical Properties of Al/SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposites Fabricated by the High

Energy Ball Milling”



## مقدمه

تحقیقات علمی در زمینه مواد به طور مداوم منجر به بهبود خواص و کارایی آنها شده است. به هر حال هر تقاضای فزاینده برای داشتن خواص بهتر در مواد مثل تحمل در دمای بالاتر، استحکام، سختی و سبک تر بودن نسبت به مواد حاضر منجر به طراحی و گسترش مواد پیشرفته تر می‌شود. در این راستا، ده‌ها هزار نوع ماده مختلف با ویژگی‌های خاصی بدست آمده اند که نیازهای جامعه مدرن و پیچیده ما را پاسخگو هستند، که از این میان می‌توان به مواد کامپوزیتی اشاره کرد.

استفاده گسترده و تمایل روزافزون به استفاده از مواد کامپوزیتی در چند دهه اخیر پیش بینی‌های قبلی را در ظهور این مواد به عنوان رقیبی جدی برای مواد سنتی محقق کرده است. شاید سرعت این کاربردها بیش از پیش بینی‌ها نیز باشد. خواص بسیار مطلوب، که به طور عمده در نسبت‌های بالای استحکام به وزن، سفتی به وزن و نیز خواص ویژه و ممتاز محیطی همچون مقاومت در برابر خوردگی و دماهای بسیار بالا و ... کامپوزیت‌ها را به عنوان جایگزینی مناسب در بسیاری از مصارف روزمره مطرح کرده اند [۲۱].

مدت‌هاست که از کامپوزیت‌ها برای حل مسائل تکنولوژیکی استفاده می‌شود. یکی از دلایل افزایش استفاده از کامپوزیت‌ها، افزایش آگاهی در مورد شکل دهی این مواد و افزایش رقابت جهانی برای ساخت قطعات سبک بود. از میان همه مواد، کامپوزیت‌ها دارای پتانسیل بالقوه بهتری برای جایگزین شدن و استفاده وسیع بجای فولاد و آلومینیوم هستند و در برخی موارد کارایی بهتری دارند [۳].

از میان انواع مختلف کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی، به دلیل سبکی، استحکام بالا، مدول بالا، ضریب انبساط گرمایی پایین و مقاومت سایشی خوب به عنوان یک گروه جدید از مواد پیشرفته به حساب می‌آیند. در همین راستا از کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی در صنایع اتومبیل سازی و هوا-فضا

مانند شافت اتومبیل‌ها، انتقال دهنده حرارت در مدارهای الکتریکی، اجزاء موتورهای و... استفاده‌های فراوانی می‌شود [۴-۷].

پارامترهای مختلفی از قبیل اندازه ذرات، نوع و توزیع تقویت کننده بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها تاثیر بسزایی دارند [۱]. یکی از این پارامترها که تأثیر بسزایی بر خواص کامپوزیت‌ها دارد، اندازه ذرات است. ظهور نانو فناوری، باعث انقلابی بنیادی در این حوزه شده است و مطالعات و تحقیقات بسیار گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است. در طی این پژوهش‌ها نشان داده شده است که وقتی یک فاز و یا هر دو فاز (زمینه و تقویت کننده) در ابعاد نانو باشند، خواص و ویژگی‌های نانو کامپوزیت نسبت به زمانی که از ذرات میکرومتری استفاده می‌شود، به طور چشمگیری بهبود می‌یابد [۸].

در این پایان نامه هدف سنتز و بررسی خواص مکانیکی (سختی) کامپوزیت و نانو کامپوزیت سه تایی  $Al/Al_2O_3p-SiC_p$  (اندیس p بدین معنی است که، ذرات به صورت پودر هستند) با استفاده از روش آسیاب کاری مکانیکی و روش تزریق پلیمری است. سنتز نمونه‌ها در دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله-سیاره‌ای (طراحی و ساخت در دانشگاه صنعتی شاهرود) صورت گرفته است. تست میکروسختی ویکرز در دانشگاه تربیت مدرس و دانشگاه شیراز انجام شده است. آنالیز ساختاری نمونه‌ها مانند تصاویر SEM در دانشگاه تهران، دانشگاه علم و صنعت و دانشگاه تربیت مدرس و تصاویر XRD نیز در دانشگاه دامغان انجام شده است.

در فرایند انجام این پایان نامه به دلیل وجود محدودیت‌های شدید تحقیقاتی، بخشی از سیستم مورد نیازمان را طراحی کرده و ساختیم. نتایج حاصل از این پایان نامه علاوه بر طراحی و ساخت تجهیزات سه مقاله کنفرانسی پذیرفته شده در کنفرانس‌های داخلی و خارجی است و یک مقاله ژورنالی است که در دست تهیه می‌باشد. موارد اشاره شده در بالا به تفصیل عبارتند از:

۱- طراحی و ساخت دستگاه آسیاب گلوله-سیاره‌ای پارانرژی

۲- طراحی و ساخت دستگاه آسیاب پروانه ای

۳- طراحی و ساخت قالب برای پرس داغ

۴- ارائه مقاله در کنفرانس انجمن فیزیک ایران سال ۹۰ با عنوان "طراحی و ساخت آسیاب سیاره ای جهت سنتز نانوذرات فلز-سرامیکی"

۵- ارائه مقاله در کنفرانس NANOSMAT ۲۰۱۱ لهستان با عنوان

“The Mechanical Properties of Al/SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposites Fabricated by the High Energy Ball Milling”

۶- ارائه مقاله در چهارمین کنفرانس بین المللی نانو ساختارهای کیش با عنوان

“Investigation of Mechanical Properties of the Hybrid Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+SiC Nanocomposite Prepared by Two Methods High Energy Ball Milling and Polymer Impregnation”

۷- دو مقاله ژورنالی نیز در دست تهیه است، که به محض تکمیل ارسال خواهد شد.

فصل اول این پایان نامه شامل دسته بندی مواد، تعریف کامپوزیتها و کامپوزیتهای زمینه فلزی،

فصل دوم مروری بر مقالات انجام شده در زمینه کامپوزیتهای زمینه فلزی، فصل سوم طراحی و ساخت

آسیاب پروانه ای، فصل چهارم سنتز و تحلیل کارهای انجام شده به روش آسیاب کاری مکانیکی، فصل

پنجم سنتز و تحلیل کارهای انجام شده به روش تزریق پلیمری می باشد.

## فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
مقدمه.....	۲
۱-۱- فلزات.....	۲
۱-۲- سرامیک ها.....	۳
۱-۳- پلیمرها.....	۳
۱-۴- کامپوزیتها.....	۴
۱-۴-۱- زمینه و تقویت کننده.....	۵
۱-۴-۲- تقسیم بندی کامپوزیتها برحسب نوع زمینه یا تقویت کننده.....	۵
۱-۴-۳- تقسیم بندی کامپوزیتها برحسب جنس زمینه.....	۸
۱-۵- اهمیت و ویژگی های کامپوزیت های زمینه فلزی.....	۹
۱-۶- نانو کامپوزیتها.....	۱۱
۱-۷- کاربرد کامپوزیت های زمینه فلزی.....	۱۱
فصل دوم.....	۱۴
فصل سوم.....	۲۴
۳-۱- آسیاب پروانه ای.....	۲۵
۳-۲- طراحی و ساخت آسیاب پروانه ای.....	۲۶
فصل چهارم.....	۳۲
۴-۱- مقدمه ای بر روش های ساخت کامپوزیت های زمینه فلزی.....	۳۳
۴-۲- آسیاب سیاره ای پرانرژی.....	۳۴
۴-۳- مشخصات آسیاب سیاره ای ساخته شده.....	۳۴
۴-۴- پارامترهای تأثیر گذار در فرآیند آسیاب کاری.....	۳۶

۳۶	.....۱-۴-۴-زمان آسیاب کاری:
۳۸	.....۲-۴-۴-سرعت آسیاب کاری
۳۹	.....۳-۴-۴-جنس قندانی
۴۱	.....۴-۴-۴-نسبت وزنی گلوله به پودر:
۴۲	.....۵-۴-۴-اندازه و توزیع اندازه ی عامل آسیاب کاری:
۴۵	.....۷-۴-۴-افزودن اتانول در فرآیند آسیاب کاری
۴۶	.....۵-۴-۵-آلودگی پودر
۴۹	.....۱-۵-۴-اسید شویی
۵۰	.....۵-۴-۵-سنتز کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها
۵۰	.....۱-۵-۴-آسیاب کاری پودرهای کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی
۵۲	.....۲-۵-۴-حذف پلیمر از پودرهای آسیاب کاری شده
۵۲	.....۳-۵-۴-آماده کردن پلی ونیل الکل (PVA)
۵۲	.....۴-۵-۴-فشرده سازی پودرهای کامپوزیتی
۵۳	.....۵-۵-۴-سینتر کردن قرص‌های پرس شده
۵۴	.....۶-۴-۶-تحلیل نمونه های سنتز شده
۵۴	.....۱-۶-۴-اندازه گیری سختی
۶۰	.....۷-۴-۷-نتیجه گیری
۶۲	.....۸-۴-۸-پیشنهاداتی بر ادامه کار
۶۳	.....فصل پنجم
۶۴	.....۱-۵-۱-روش تزریق پلیمر
۶۵	.....۲-۵-۲-سنتز نمونه ها
۶۷	.....۳-۵-۳-تحلیل نمونه های سنتز شده

۴-۵- نتیجه گیری ..... ۶۹

۵-۵- پیشنهاداتی بر ادامه کار ..... ۶۹

مراجع ..... ۷۶

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۲-۱- تأثیر اندازه ذرات و درصد حجمی  $Al_2O_3$  بر سختی نانو کامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  [۱۸]. ..... ۱۶
- شکل ۲-۲- تأثیر میزان SiC بر سختی کامپوزیت  $Al/SiC$  [۲۴]. ..... ۱۸
- شکل ۲-۳- تأثیر میزان SiC بر روی مدول یانگ کامپوزیت  $Al/SiC$  [۲۴]. ..... ۱۸
- شکل ۲-۴- افزایش استحکام نانو کامپوزیت  $Al/TiC$  با افزایش درصد حجمی یا کاهش اندازه ذرات فاز تقویت کننده [۲۵]. ..... ۱۹
- شکل ۲-۵- تأثیر زمان آسیاب کاری بر روی  $Al/SiC$  با درصد حجمی ۵٪ و ۱۵٪ SiC [۳۰]. ..... ۲۱
- شکل ۲-۶- تأثیر زمان آسیاب کاری بر روی  $Al/Al_2O_3$  با درصد حجمی ۵٪ و ۱۵٪  $Al_2O_3$  [۳۰]. .. ۲۱
- شکل ۲-۷- تأثیر زمان و سرعت آسیاب کاری بر روی نانو کامپوزیت  $Al/SiC$  (سایز گلوله ۱۰ mm) [۳۱]. ۲۲
- شکل ۲-۸- تأثیر زمان و سرعت آسیاب کاری بر روی نانو کامپوزیت  $Al/SiC$  (سایز گلوله ۲۰ mm) [۳۱]. ۲۳
- شکل ۳-۱- تصویر شماتیکی از آسیاب پروانه ای، به همراه پره‌ها و گلوله‌های آن [۳۸]. ..... ۲۶
- شکل ۳-۲- تصاویر اتصال موتور و پروانه‌های آسیاب پروانه ای. .... ۲۷
- شکل ۳-۳- تصویری از سیستم کنترلی لمسی دستگاه آسیاب پروانه ای. .... ۲۷
- شکل ۳-۴- تصویر قندانی فولادی و تفلونی ساخته شده برای آسیاب پروانه ای. .... ۲۸
- شکل ۳-۵- تصویری از پودر کامپوزیتی  $Al/SiC$  که بعد از آسیاب کاری سوخته است. .... ۲۹
- شکل ۳-۶- اندازه دانه  $CoZr$  بر حسب زمان آسیاب کاری [۴۰]. ..... ۳۱
- شکل ۴-۱- تصویری شماتیک از حرکت قندانی‌ها و صفحه چرخان [۴۱]. ..... ۳۵
- شکل ۴-۲- تصویر SEM مربوط به نمونه الف (S1 و ب) S2. .... ۳۷
- شکل ۴-۳- تصویر SEM مربوط به نمونه الف (CAS1 و ب) CAS2. .... ۳۹
- شکل ۴-۴- تصویر SEM مربوط به نمونه S3. .... ۴۰

- شکل ۴-۵- تصویر SEM مربوط به نمونه S4 ..... ۴۱
- شکل ۴-۶- تصویر SEM مربوط به نمونه الف (CAS1 و ب) CAS2 ..... ۴۳
- شکل ۴-۷- تصویر SEM مربوط به نمونه الف (CAS3 و ب) CAS4 ..... ۴۴
- شکل ۴-۸- تصویر SEM نمونه CAS7 ..... ۴۵
- شکل ۴-۹- تصاویر XRD، نمونه CAS1 ..... ۴۷
- شکل ۴-۱۰- تصویر XRD نمونه S5، پیک‌های مشخص شده مربوط به ناخالصی آهن است. .... ۴۸
- شکل ۴-۱۱- تصویر XRD نمونه S7 بعد از اسید شویی، پیک‌ها مربوط به SiC است. .... ۴۹
- شکل ۴-۱۲- تصویری از قالب پرس ..... ۵۳
- شکل ۴-۱۳- تصویری از کامپوزیت سنتز شده که به شکل قرص است ..... ۵۳
- شکل ۴-۱۴- نمودار میکروسختی ویکرز کامپوزیت Al/SiC بر حسب درونی SiC ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۵- نمودار میکروسختی ویکرز کامپوزیت و نانوکامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بر حسب میزان Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> .. ۵۷
- شکل ۴-۱۶- نمودار میکروسختی ویکرز کامپوزیت و نانوکامپوزیت سه تایی Al/SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با درصد وزنی‌های مختلف فاز تقویت کننده ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۷- نمودار میکروسختی ویکرز کامپوزیت و نانوکامپوزیت Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-7.5%wt SiC-7.5%wt Al در دماهای ۵۰۰ °C و ۵۵۰ °C ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۸- عدد میکروسختی کامپوزیت و نانوکامپوزیت Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-7.5%wt SiC-7.5%wt Al در فشارهای ۲۵۰ MPa و ۳۵۰ MPa ..... ۷۰



## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ - میکروسختی نانوکامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  بر اساس درصد حجمی و سایز ذرات  $Al_2O_3$  [۱۸]. ۱۶
- جدول ۲-۲ - خواص مکانیکی کامپوزیت و نانوکامپوزیت  $Al/SiC$  [۲۴]. ۱۸
- جدول ۴-۱ - پارامترهای آسیاب کاری نمونه‌های S1 و S2 ..... ۳۶
- جدول ۴-۲ - پارامترهای آسیاب کاری نمونه‌های CAS1 و CAS2 ..... ۳۸
- جدول ۴-۳ - پارامترهای آسیاب کاری نمونه S3 ..... ۴۰
- جدول ۴-۴ - پارامترهای آسیاب کاری نمونه S4 ..... ۴۱
- جدول ۴-۵ - پارامترهای آسیاب کاری نمونه CAS1 و CAS2 ..... ۴۲
- جدول ۴-۶ - پارامترهای آسیاب کاری نمونه CAS3 و CAS4 ..... ۴۴
- جدول ۴-۷ - پارامترهای آسیاب کاری نمونه CAS7 ..... ۴۶
- جدول ۴-۸ - پارامترهای آسیاب کاری نمونه S7 ..... ۴۸
- جدول ۴-۹ - درصد وزنی نمونه‌های کامپوزیتی ..... ۵۰
- جدول ۴-۱۰ - درصد وزنی نمونه‌های نانوکامپوزیتی ..... ۵۱
- جدول ۴-۱۱ - شرایط آسیاب کاری پودرهای کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی ..... ۵۱
- جدول ۴-۱۲ - عدد میکروسختی کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های سنتز شده ..... ۵۵
- جدول ۴-۱۳ - عدد میکروسختی کامپوزیت و نانوکامپوزیت  $Al_2O_3-7.5\%wt SiC-7.5\%wt Al$  در دماهای  $500^\circ C$  و  $550^\circ C$  ..... ۵۹
- جدول ۴-۱۴ - عدد میکروسختی کامپوزیت و نانوکامپوزیت  $Al_2O_3-7.5\%wt SiC-7.5\%wt Al$  در فشارهای ۲۵۰ MPa و ۳۵۰ MPa ..... ۶۰

- جدول ۵-۱- درصد وزنی نمونه‌های سنتز شده به روش آسیاب کاری ..... ۶۵
- جدول ۵-۲- درصد وزنی نمونه‌های سنتز شده به روش تزریق پلیمر ..... ۶۵
- جدول ۵-۳- شرایط آسیاب کاری نمونه‌های سنتز شده به روش تزریق پلیمر ..... ۶۶
- جدول ۵-۴- عدد میکروسختی کامپوزیت سه تایی  $Al/SiC-Al_2O_3$  سنتز شده به روش آسیاب کاری و تزریق پلیمری ..... ۶۸

فصل اول

دسته بندی مواد

## مقدمه

بیش از ده‌ها هزار نوع ماده برای طراحی و ساخت محصولات جهت کاربردهای مختلف وجود دارد. محدوده این مواد، از مواد معمول مانند مس، چدن و برنج که در حدود صد سال است که استفاده می‌شوند تا مواد پیشرفته از قبیل کامپوزیت‌ها، سرامیک‌ها، فولادهای با دمای کاربرد بالا که به تازگی گسترش یافته‌اند، می‌باشد. به دلیل تنوع زیاد در انتخاب مواد، امروزه مهندسين تلاش‌های زیادی انجام می‌دهند تا بتوانند برای ساخت یک محصول، مواد مناسب و فرآیند ساخت مناسب آن را انتخاب کنند. طبقه بندی همه‌ی این مواد بسیار مشکل است. بنابراین، یک طبقه بندی جامع برای تشخیص ویژگی‌های مواد و ساده سازی روش انتخاب آنها ضروری است.

برای مواد طبقه بندی‌های متفاوتی در نظر گرفته شده است اما، به طور کلی، مواد بر اساس ساختار شیمیایی و خواص فیزیکی آنها به چهار گروه اصلی زیر تقسیم می‌شوند:

### ۱-۱- فلزات

در گذشته فلزات موادی برجسته و ممتاز برای کاربردهای ساختمانی و مهندسی بوده‌اند. مواد فلزی از نظر اهمیتی که در صنعت دارند به دو گروه ۱- فلزات آهنی و آلیاژهای آن ۲- فلزات غیرآهنی و آلیاژهای آن تقسیم بندی می‌شوند. فلزات در شرایط معمولی دارای ساختار کریستالی‌اند.

فلزات دارای سختی، استحکام، پایداری گرمایی، هدایت گرمایی و الکتریکی بالا هستند. اغلب فلزات در درجه حرارت‌های معمولی محیط شکل‌پذیر بوده و در مقابل واکنش‌های شیمیایی پایداری بسیار بالایی ندارند. به دلیل استحکام بالای فلزات به طور وسیع در سازه‌های مختلف به کار برده می‌شوند. فلزات به صورت خالص به ندرت به کار می‌روند و اغلب از آلیاژهای آنها در صنایع مختلف استفاده می‌شود. [۹ و ۳]

## ۱-۲- سرامیک‌ها

سرامیک‌ها ترکیباتی از عناصر فلزی و غیر فلزی می‌باشند و اغلب از اکسیدها، نیتريد‌ها و کربیدها تشکیل گردیده‌اند. سرامیک‌ها دارای پیوند کوالانسی قوی هستند، بنابراین دارای پایداری حرارتی فوق العاده و سختی بالا می‌باشند. اصلی‌ترین ویژگی بارز سرامیک‌ها نسبت به فلزات این است که، سرامیک‌ها هیچ گونه نرمی و انعطافی از خود نشان نمی‌دهند و خیلی ترد و شکننده می‌باشند. سرامیک‌ها نسبت به مواد مهندسی دیگر دارای بالاترین نقطه ذوب هستند و معمولا در مواردی که دمای بالا و مقاومت به سایش بالا لازم است، به کار می‌روند، همچنین در مقابل مواد شیمیایی مقاومت به خوردگی خوبی دارند. این مواد نوعا عایق الکتریسیته و گرما هستند. [۹۳و]

## ۱-۳- پلیمرها

مواد پلیمری از کنار هم قرار گرفتن تعداد زیادی از مولکول‌های زنجیره ای یا شبکه‌های بزرگ مواد آلی که از نظر شیمیایی بر پایه کربن، هیدروژن و برخی عناصر غیر فلزی هستند، تشکیل شده‌اند. این مواد در درجه حرارت‌های پایین (زیر صفر) ترد می‌شوند ولی در درجه حرارت‌های نسبتا بالا قابلیت شکل پذیری دارند و در درجه حرارت‌های بالا ذوب یا متلاشی می‌شوند. این مواد نوعا دارای چگالی پایین هستند و ممکن است خیلی انعطاف پذیر باشند. مواد پلیمری در مقابل عوامل و واکنش‌های شیمیایی در درجه حرارت معمولی محیط و در مجاورت هوای آزاد پایداری دارند. [۹۱و۱۰]

## ۱-۴ - کامپوزیت‌ها

ترکیب مواد برای ساختن یک ماده جدید با خواص بهتر از گذشته‌های دور مطرح بوده است. مثلاً بردگان تحت سلطنت فرعون، برای افزایش یکپارچگی و استحکام خشت‌ها از کاه‌های ریز شده، سامورایی‌ها از ژاپنی از فلزات چند لایه در ساخت شمشیر و برخی از صنعتگران اهل مدیترانه و خاور دور، شکل خاصی از تکنولوژی کامپوزیت را در قالب‌گیری کارهای هنری استفاده می‌کردند، همچنین آنها جهت تولید اشکال و نماهای مطلوب از لایه گذاری کاغذهای بریده شده در اندازه‌های مختلف استفاده می‌کردند؛ نمونه‌های کاربردی ترکیب مواد از گذشته دور است.

قدمت اولین ماده کامپوزیتی به قدمت بشر و حیات وی است. استخوانها و بافت ماهیچه یک کامپوزیت لایه لایه چند جهتی هستند. کامپوزیت‌های دیگری نیز در طبیعت وجود دارد، برای مثال چوب که ترکیبی از الیاف سلولزی در زمینه چسبی به نام لینگین<sup>۱</sup> تشکیل شده است، یک کامپوزیت است. صدف جانداران بی مهره مثل حلزون و صدف خوراکی مثال دیگری از کامپوزیت‌هاست. بعضی از پوسته صدف‌ها از کامپوزیت‌های پیشرفته‌ای که توسط بشر ساخته شده سخت‌تر و مستحکم‌تر است. [۱۱۳]

کامپوزیت‌ها ترکیبی از چند ماده (حداقل دو ماده) یا جزء اصلی هستند. اجزای تشکیل دهنده هر کامپوزیت از لحاظ شکل، ترکیب شیمیایی و خواص با یکدیگر متفاوتند و در یکدیگر حل نمی‌شوند و از نظر اندازه و ابعاد در حد میکروسکوپی و ماکروسکوپی وجود دارند. کامپوزیت‌ها در اصل به منظور دستیابی به ترکیبی از خواص، که در هر یک از مواد یا اجزای تشکیل دهنده آنها به تنهایی وجود ندارد، تولید می‌شوند. بدین منظور می‌توان موادی با خواص جدید و بهتر با توجه به کاربردهای صنعتی مورد نظر تولید

کرد. [۱۳و۱۲]

---

<sup>۱</sup> - lingin

#### ۱-۴-۱- زمینہ<sup>۱</sup> و تقویت کننده<sup>۲</sup>

هر کامپوزیت از دو جزء یا فاز تشکیل شده است: زمینہ و تقویت کننده. زمینہ یک فاز پیوسته است که، تقویت کننده که یک فاز ناپیوسته است در آن قرار می‌گیرد. زمینہ تقویت کننده را نگه می‌دارد تا شکل دلخواه تشکیل شود، در حالی که تقویت کننده خواص زمینہ را بهبود می‌بخشد [۱۳].

با انتخاب نوع زمینہ، شکل و میزان فاز تقویت کننده می‌توان کامپوزیت‌های زیادی با خواص مکانیکی متفاوت تولید کرد. فاز تقویت کننده بیشترین تأثیر را بر روی خواص مکانیکی از قبیل مقدار مدول ینگ، مقاومت در برابر سایش، چقرمگی شکست<sup>۳</sup>، مقاومت در برابر خستگی<sup>۴</sup> و ضریب انبساط گرمایی دارد [۱۴].

#### ۱-۴-۲- تقسیم بندی کامپوزیت‌ها بر حسب نوع زمینہ یا تقویت کننده

برای کامپوزیت‌ها بر حسب اینکه آنها را بر اساس نوع زمینہ یا تقویت کننده تقسیم بندی کنیم، دو نوع تقسیم بندی داریم.

کامپوزیت‌ها بر اساس شکل و ساختار تقویت کننده اصولاً به سه دسته تقسیم بندی می‌شوند:

---

1- Matrix  
2- Reinforcement  
3- Ftacture Toughness  
4- Fatigue

## الف - کامپوزیت‌های ذره ای<sup>۱</sup>

در کامپوزیت‌های ذره‌ای، فاز تقویت کننده به صورت پراکنده و با توزیع یکنواخت در فاز زمینه قرار می‌گیرند. شکل تقویت کننده ممکن است به صورت کروی، مکعبی، صفحات کوچک و یا دیگر شکل‌های منظم و یا غیر منظم باشد. تقویت کننده‌های ذره ای به طور گسترده استفاده می‌شوند تا بهبودی در خواص مواد زمینه مانند تعدیل رسانندگی گرمایی و الکتریکی، بهبود عملکرد در دماهای بالا، افزایش مقاومت به سایش، بهبود ماشین کاری، افزایش سختی و... حاصل شود [۱۴]. ذرات فاز تقویت کننده می‌توانند به صورت نامنظم و غیر یکنواخت در مرزخانه‌ها، یا تقریباً یکنواخت در تمامی زمینه پراکنده و توزیع شوند. بدین صورت توزیع ذرات ماده تقویت کننده در ماده زمینه می‌تواند به گونه‌ای باشد که خواص ایجاد شده به صورت همسانگرد و یا ناهمسانگرد باشد.

خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت به مقدار درصد ذرات فاز دوم، اندازه و شکل ذرات و نحوه توزیع آنها در فاز زمینه بستگی دارد. اگر ذرات پراکنده شده در فاز زمینه به صورت ریز و تقریباً یکنواخت توزیع شده و با فاز زمینه تطابق ساختاری نداشته باشد، مانع حرکت نابجایی‌ها شده و موجب افزایش استحکام فاز زمینه می‌شود.

خواص معینی از کامپوزیت ذره‌ای فقط به مقدار نسبی فازها و خواص هر یک از اجزاء تشکیل دهنده آن بستگی دارد. قانون مخلوط کردن می‌تواند این خواص را پیش‌گویی کند. برای مثال چگالی ذرات کامپوزیت از رابطه (۱-۱) بدست می‌آید:

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n f_i \rho_i = f_1 \rho_1 + f_2 \rho_2 + \dots + f_n \rho_n \quad (1-1)$$

در این رابطه  $\rho_c$  چگالی کامپوزیت و  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  چگالی و  $f_1, f_2, \dots, f_n$  کسر حجمی هر یک از

اجزاء هستند [۱۰].

---

<sup>1</sup> - Particles Composites



## ب- کامپوزیت‌های الیافی (پیوسته یا ناپیوسته)<sup>۱</sup>

در کامپوزیت‌های الیافی، تقویت کننده‌ها به صورت الیاف پیوسته و یا ناپیوسته در زمینه قرار دارند. الیاف دارای این ویژگی هستند که نسبت طول به اندازه سطح مقطع عرضی آنها خیلی بیشتر است [۱۴]. در اغلب کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف مستحکم و سفت خواص مکانیکی از قبیل استحکام، مقاومت به خستگی، سفتی<sup>۲</sup>، نسبت استحکام به وزن بهبود می‌یابند.

الیاف را می‌توان در جهات مختلف در کامپوزیت قرار داد و این باعث افزایش استحکام کامپوزیت در جهت دلخواه قطعه می‌شود. در این کامپوزیت‌ها ماده زمینه تنش اعمالی را به الیاف منتقل می‌کند. استحکام کامپوزیت می‌تواند در دمای معمولی محیط و هم در دمای بالا در حد بالایی باشد [۱۰]. استحکام این نوع کامپوزیت در کل بیش از کامپوزیت ذره ای است. الیاف‌ها در بهبود مقاومت به شکست زمینه به طور چشمگیری نقش دارند. به دلیل اینکه تقویت کننده ابعاد بزرگی دارد، مانع رشد ترک‌های ابتدایی نرمال می‌شود، مخصوصاً در زمینه‌های ترد و شکننده [۱۴].

برای تعیین چگالی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف می‌توان از همان رابطه ارائه شده برای کامپوزیت‌های ذره ای استفاده کرد:

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_f \rho_f$$

در این رابطه اندیس‌های m و f به فاز زمینه و الیاف نسبت داده می‌شود و  $f_m + f_f = 100\%$  است.

در طراحی کامپوزیت‌های الیافی باید به عوامل زیادی مانند طول، قطر، جهت، مقدار و خواص الیاف و همچنین خواص زمینه، اتصال بین الیاف و زمینه توجه شود [۱۰].

<sup>1</sup>- Fibers composites (continuous or discontinuous)

<sup>2</sup>- Stiffness

## ج- کامپوزیت‌های لایه ای<sup>۱</sup>

این نوع کامپوزیت‌ها از لایه‌هایی با مواد مختلف تشکیل می‌شوند. ورقه‌ها لایه‌هایی از مواد به هم پیوسته با یک چسب آلی اند. خصوصیتی از قبیل استحکام، سفتی، وزن کم، مقاومت در مقابل خوردگی، مقاومت در برابر سایش و ... را می‌توان بدین وسیله بدست آورد. روش‌های متعددی در تولید این کامپوزیت به کار می‌روند، که در نوع و تکنیک تغییر فرم و اتصال لایه‌ها متفاوتند [۳]. کامپوزیت‌های لایه ای از لحاظ خواص مکانیکی و فیزیکی بسیار ناهمسانگردند [۱۱].

### ۱-۴-۳- تقسیم بندی کامپوزیت‌ها بر حسب جنس زمینه

#### الف- کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی

کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی (CMCs<sup>۲</sup>)، به دلیل اینکه وزن کم تری نسبت به کامپوزیت‌های زمینه فلزی دارند، برای کاربردهای خاصی در دماهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹].

#### ب- کامپوزیت‌های زمینه پلیمری

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری (PMCs<sup>۳</sup>) به طور ویژه ای متداول اند. این نوع کامپوزیت از پلیمری (اپوکسی، پلی استر و ...) که با الیاف (گرافیت، آرامید، برون و...) تقویت شده است، ساخته شده اند. برای مثال کامپوزیت اپوکسی/گرافیت ۵ برابر مستحکم تر از فولاد است. به دلیل هزینه کمتر، استحکام بیشتر و فرآیند ساخت آسان تر این گروه از کامپوزیت‌ها متداول تر می‌باشند.

---

<sup>۱</sup>- Laminar Composites

<sup>۲</sup>- Ceramics Matrix Composites

<sup>۳</sup>- Polymers Matrix Composites

معایب اصلی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری عبارتند از: دمای عملکرد پایین، ضریب انبساط گرمایی و رطوبت بالا، و خواص الاستیسیته پایین در یک جهت معین [۱۲].

### ج- کامپوزیت‌های زمینه فلزی

کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs<sup>۱</sup>) دارای ترکیبی از خواص فلزی (انعطاف پذیری و چقرمگی) و ویژگی‌های سرامیک (استحکام و مدول بالا) هستند. متداول ترین فلزاتی که برای فاز زمینه به کار می‌روند، فلزاتی از قبیل آلومینیوم، مس، نیکل و ... می‌باشند. سرامیک‌هایی از قبیل کربیدها، نیتريد‌ها، بریدها، اکسیدها و مخلوطی از آنها نیز به عنوان تقویت کننده به کار می‌روند [۱۵].

### ۱-۵- اهمیت و ویژگی‌های کامپوزیت‌های زمینه فلزی

امروزه برای مواد مورد استفاده در تجهیزات مختلف، خواص متنوعی با توجه به شرایط کاری آنها مورد نیاز است. در ساخت تجهیزات فضایی به موادی نیاز است تا بتواند بارگذاری و شوک حرارتی در مسیر حرکت از سطح زمین را تحمل کند و در درجه حرارت کم فضا عملکرد خوبی از خود نشان دهد، یا در راکتورهای هسته ای به موادی نیاز است تا استحکام خود را در درجه حرارت بسیار بالا حفظ کند. بنابراین انتخاب ماده مناسب برای ساخت این تجهیزات، با توجه به شرایط کاری آنها، از موضوع‌های مهم مهندسی است. یک گروه از این مواد کامپوزیت‌های زمینه فلزی است.

کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل عملکرد فوق العاده ای که دارند، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سال ۲۰۰۴، بیش از ۳/۵ میلیون کیلوگرم کامپوزیت زمینه فلزی مورد استفاده قرار گرفت و میزان استفاده از این مواد با آهنگ رشد ۶٪ در سال رو به افزایش بوده است [۱۶].

---

<sup>۱</sup> - metals matrix composites

یک انتخاب مناسب از نوع و شکل هندسی فاز تقویت کننده برای رسیدن به بهترین ترکیب از خواص مورد نیاز و هزینه‌ها بسیار مهم است. اصولاً فاز تقویت کننده که برای تولید کامپوزیت‌های تقویت شده با تقویت کننده‌های ناپیوسته می‌شوند، عبارتند از: ذرات SiC یا  $Al_2O_3$ ، الیاف کوتاه گرافیت یا  $Al_2O_3$  و ویسکرهای SiC. در مقایسه با الیاف، ذرات و ویسکرها برای تولید کامپوزیت راحت تر هستند، همچنین کم هزینه تر می‌باشند و دارای خواص همسانگردتر هستند [۱۴]. از میان انواع تقویت کننده، سیلیکون کاربید و آلومینا به دلیل قیمت مناسب تر و دسترسی آسان تر بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۷].

خواص کامپوزیت‌های زمینه فلزی به طور مشخص به اندازه و کسر حجمی تقویت کننده و همچنین به طبیعت فصل مشترک زمینه و تقویت کننده بستگی دارد [۱۵ و ۱۸]. توزیع همگن مواد کامپوزیتی، یک مسئله بسیار مهم برای عملکرد بهتر کامپوزیت است. توزیع غیر یکنواخت تقویت کننده، می‌تواند منجر به انعطاف پذیری<sup>۱</sup>، استحکام و چقرمگی پایین می‌شود [۱۹].

ویژگی‌های کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبت به فلز و یا آلیاژ زمینه:

- افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی در دمای اتاق و بالاتر
- افزایش مقاومت در برابر خزش در دماهای بالا در مقایسه با آلیاژهای متعارف
- مقاومت در برابر سایش
- افزایش در استحکام خستگی، خصوصاً در دماهای بالا
- بهبود مقاومت شوک پذیری گرمایی
- بهبود مقاومت در برابر خوردگی
- افزایش مدول یانگ

---

<sup>1</sup> - Ductility

• کاهش ضریب انبساط گرمایی

• رسانندگی گرمایی بالاتر

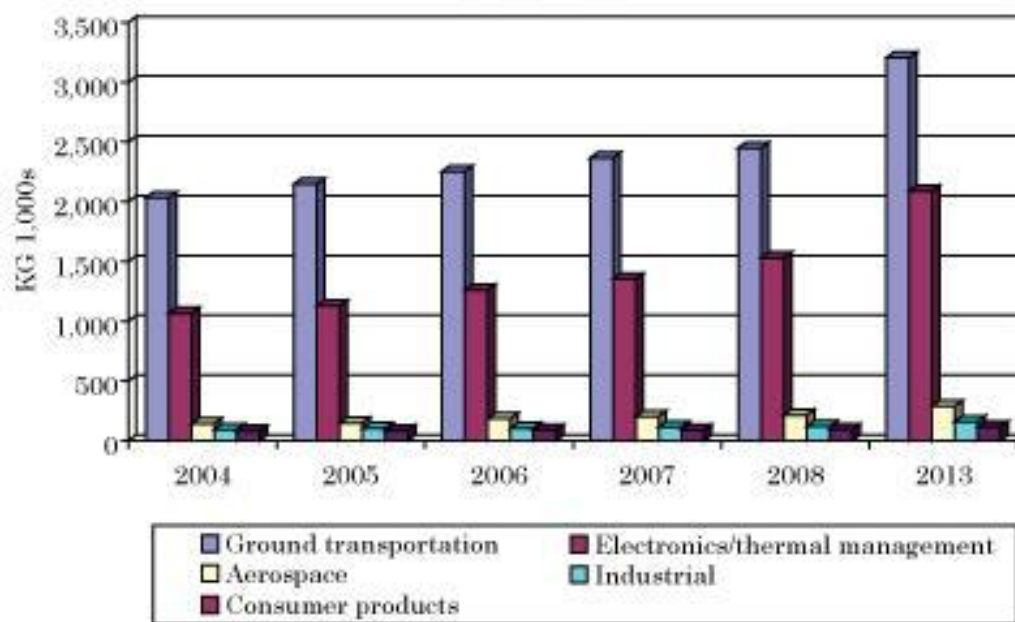
• چگالی کم [۲۰ و ۱۳].

## ۱-۶- نانو کامپوزیت‌ها

پارامترهای مختلفی از قبیل اندازه ذرات، نوع و توزیع تقویت کننده بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها تاثیر بسزایی دارند [۱]. یکی از این پارامترها که تأثیر بسزایی بر خواص کامپوزیت‌ها دارد، اندازه ذرات است. ظهور نانو فناوری، باعث انقلابی بنیادی در این حوزه شده است و مطالعات و تحقیقات بسیار گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است. در طی این پژوهش‌ها نشان داده شده است که وقتی یک فاز و یا هر دو فاز (زمینه و تقویت کننده) در ابعاد نانو باشند، خواص و ویژگی‌های (مواردی که در بخش قبلی بیان شد) نانو کامپوزیت‌ها نسبت به زمانی که از ذرات میکرومتری استفاده می‌شود، به طور چشمگیری بهبود می‌یابد [۸].

## ۱-۷- کاربرد کامپوزیت‌های زمینه فلزی

نیاز مبرم وسایل نقلیه به کاهش مصرف سوخت در صنعت اتومبیل سازی، کامپوزیت‌ها را به عنوان گذرگاهی مهندسی برای یک آینده قابل اطمینان مورد توجه قرار می‌دهد. تقریباً افزایش ۷۰ درصدی، کامپوزیت‌های زمینه فلزی از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۳ برای استفاده در صنایع مختلف تخمین زده شده است (شکل ۱-۲).



Source: BCC Research

شکل ۱-۱- نمودار مصرف کامپوزیت‌های زمینه فلزی در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۳ [۲۱].

کامپوزیت‌های زمینه فلزی در زمینه‌های مختلفی مانند، صنایع اتومبیل سازی، الکترونیک و

تولیدات صنعتی و رفاهی کاربرد دارند [۱۹].

یکی از کاربردهای قابل توجه کامپوزیت‌های زمینه فلزی در کابل ابررساناها برای راکتورهای هسته

ای است [۱۰].

جیسون لو<sup>۱</sup> کانادایی گسترش و استفاده از یک کامپوزیت جدید Al-SiC برای استفاده در ترمز را

مطرح کرده است. او نشان داد، استفاده از کامپوزیت A350-20%SiCp به عنوان دیسک ترمز، که فقط kg

۳/۳ وزن دارد، باعث می‌شود، حدود ۶۰٪ ذخیره در وزن تولیدات متعارف می‌شود. این کاهش وزن نیز به

نوبه خود باعث ذخیره انرژی تا ۰/۲۵ mpg می‌شود [۱۷].

1- Jason Lo

از آلومینیوم‌های تقویت شده الیاف پیوسته برن در مدار پیمای فضایی شاتل<sup>۱</sup>، به عنوان قاب و تیغه خریا در بخش میانی بدنه هواپیما استفاده شده است. کامپوزیت Gr/Al یکی از اجزاء تشکیل دهنده بازوی متحرک آنتن تلسکوپ فضایی هابل است. این بازوی متحرک استحکام لازم برای نگه داری موقعیت آنتن در طول مانورهای فضایی را داراست [۱۹].

در میان کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی، الیاف  $Al_2O_3$  به عنوان ماده تقویت کننده در بعضی از پیستون‌های موتورهای دیزلی، الیاف و ویسکرهاى SiC در صنایع هوا-فضا، الیاف کربن برای دکل‌های آنتن آلومینیومی به کار می‌رود.

کامپوزیت‌های زمینه فلزی کاربردهای مهمی در ساخت موتورهای راکت‌ها یا هواپیماها دارند. سوپر آلیاژهای تقویت شده با الیاف فلزی، مانند تنگستن، یا الیاف سرامیکی، مانند SiC یا  $B_4N$ ، استحکام خود را در دماهای بالا نیز حفظ می‌کنند، به طوری که کارایی موتورهای جت را افزایش می‌دهند. تیتانیوم و آلیاژهای Ti-Al تقویت شده با الیاف SiC برای پره‌های توربین و دیسک‌ها به کار می‌رود. همچنین آلیاژهای پایه نیکل تقویت شده با الیاف SiC برای ساخت پروانه‌های کشتی‌ها به کار می‌رود [۱۰].

شرکت‌هایی همچون شورت<sup>۲</sup>، موتورولا<sup>۳</sup> و تویوتا<sup>۴</sup> نیز برای قسمت‌هایی از محصولات خود از کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی استفاده می‌کنند [۲۱].

---

1- Space Shattle Orbiter  
2- Chevrolet  
3- Motorola  
4- Toyota

مروری بر پژوهش‌های انجام شده

بر خواص نانوکامپوزیت‌ها



## ۲-۱- مقدمه

مواد مونولیتیک متداول، محدودیت‌هایی در بهبود هم زمان خواصی مانند استحکام، سفتی، چقرمگی و چگالی دارند. برای غلبه بر این محدودیت‌ها و پاسخ گویی به نیازهای تکنولوژی امروز، کامپوزیت‌ها از جمله موادی هستند، که مورد توجه قرار گرفته اند [۲۱].

کامپوزیت‌های زمینه فلزی نسبت به فلز و یا آلیاژ زمینه خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب تری دارند. ویژگی‌هایی از قبیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر سایش، پایداری گرمایی و ... باعث شده است، در چند سال اخیر توجه خاصی به این دسته از مواد توجه خاصی شود. همچنین تحقیقات گسترده ای نیز در این زمینه صورت گرفته است [۱۳].

در بین کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی، به دلیل سبکی، استحکام بالا، مدول یانگ بالا، ضریب انبساط گرمایی پایین و مقاومت سایشی خوب به عنوان یک گروه جدید از مواد پیشرفته به حساب می‌آیند. در همین راستا از کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی کاربردهای متعددی در صنایع اتومبیل سازی و هوا-فضا مانند انتقال دهنده حرارت در مدارهای الکتریکی، اجزاء موتورهای پیش بینی می‌شود [۴-۷].

کشف ابتدایی سنتز کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی (به روش ریخته گری) که منجر به سنتز کامپوزیت‌هایی از قبیل گرافیت/Al، Al/SiC، Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در سال ۱۹۶۵ بوسیله ردیپ روهاتگی<sup>۱</sup> در آزمایشگاه تحقیقاتی پائول د.میرکا<sup>۲</sup>، شرکت بین المللی نیکل<sup>۳</sup>، سورفرن نیویورک انجام شد. پی بردن به اصول و تکنولوژی وابسته به ساخت و استفاده از این کامپوزیت‌ها راهی طولانی را از زمان کشف روهاتگی طی کرده است [۱۷].

---

<sup>1</sup>- Radeep Rohatgi

<sup>2</sup>- Paul D.Merica

<sup>3</sup>- International Nickel Company

## ۲-۲- عوامل مؤثر بر خواص نانوکامپوزیت‌ها

متغیرهای مختلفی از قبیل اندازه ذرات، نوع، میزان و توزیع تقویت کننده، واکنش‌های فصل مشترک زمینه و تقویت کننده، روش‌های ساخت و... بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها تاثیر بسزایی دارند. در ادامه برخی از پژوهش‌هایی که تا کنون به تاثیر هر یک از این متغیرها بر روی خواص و ویژگی‌های کامپوزیت‌ها پرداخته اند، مطرح شده اند.:

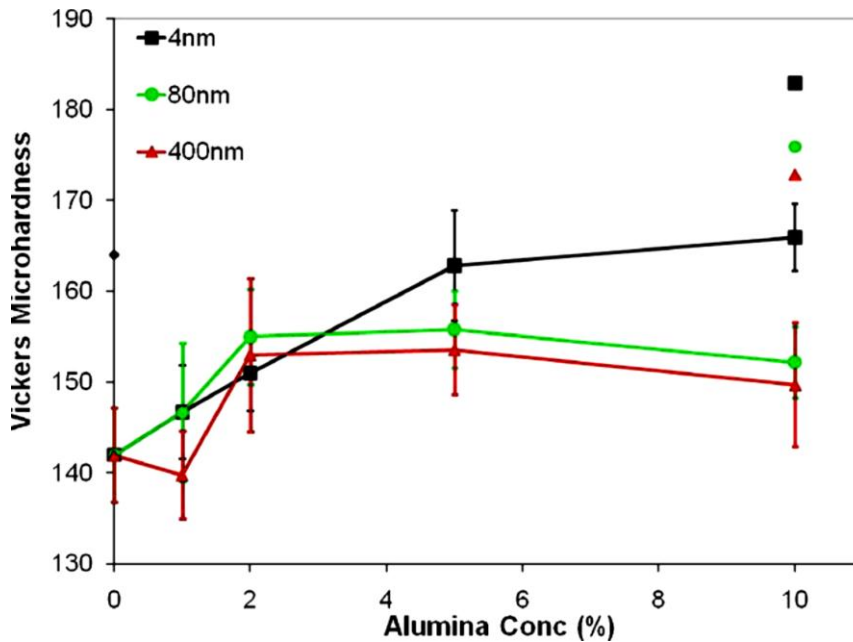
### الف- اندازه ذرات و میزان تقویت کننده:

در یک پژوهش که توسط د. پویریر<sup>۱</sup> و همکارانش صورت گرفته است، تاثیر اندازه ذرات بر روی خواص و ویژگی‌های نانوکامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  را بررسی کردند. جدول ۱-۲ و شکل ۱-۲ تاثیر اندازه ذرات و میزان تقویت کننده بر روی سختی را نشان می‌دهد. همان طور که در جدول ۱-۲ و شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود، با کاهش اندازه ذرات و افزایش میزان تقویت کننده سختی نانوکامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  افزایش یافته است. سختی نانوکامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  تقریباً ۵ برابر  $Al$  آسیاب نشده است. همچنین با کاهش اندازه ذرات از ۴۰۰ nm به ۴ nm سختی نمونه ۱۱٪ افزایش یافت [۱۶].

Conc.	Size		
	4 nm	80 nm	400 nm
0% (initial)	30 ± 7		
0% (milled)	142 ± 5		
1%	147 ± 5	147 ± 8	140 ± 5
2%	151 ± 4	155 ± 5	153 ± 8
5%	163 ± 6	156 ± 4	154 ± 5
10%	166 ± 4	152 ± 4	150 ± 7

جدول ۲-۱- میکروسختی نانوکامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  بر اساس درصد حجمی و سایز ذرات  $Al_2O_3$  [۱۶].

<sup>1</sup>- D. Poirier

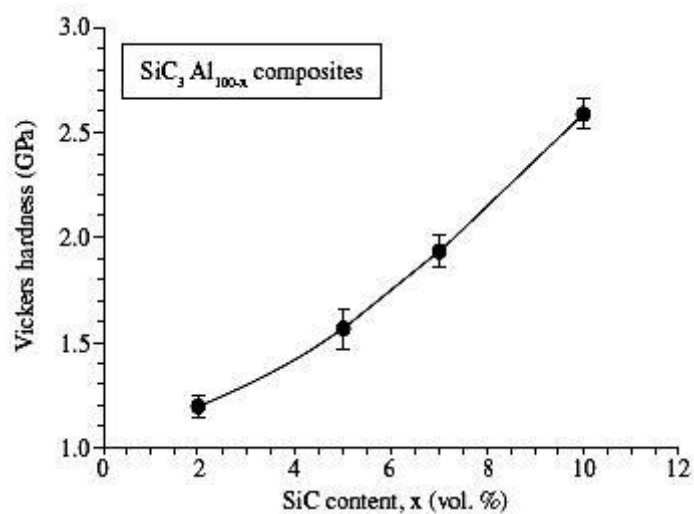


شکل ۲-۱- تأثیر اندازه ذرات و درصد حجمی  $Al_2O_3$  بر سختی نانوکامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  [۱۶].

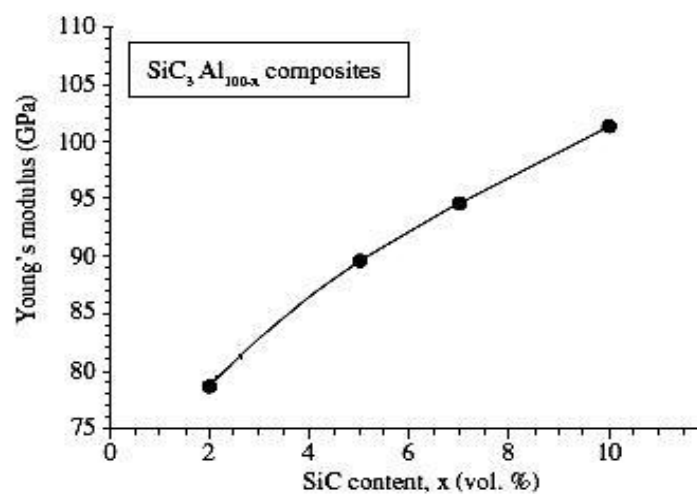
در پژوهشی دیگر، کامپوزیت  $Al/SiC$  در حالتی که اندازه ذرات میکرو و نانو باشد با هم مقایسه شدند. در شکل ۲-۲ نمودار سختی ویکرز بر حسب درصد حجمی  $SiC$  و شکل ۳-۲ نمودار مدول یانگ بر حسب میزان درصد حجمی  $SiC$  رسم شده است. همان طور که در شکل ۲-۲ دیده می‌شود، سختی نمونه‌ها با افزایش میزان درصد حجمی  $SiC$  به طور خطی افزایش می‌یابد و در حالتی که درصد حجمی  $SiC$  ۱۰٪ است، سختی ۲/۶ GPa شده است. مدول یانگ نیز با افزایش میزان درصد حجمی  $SiC$  افزایش می‌یابد. جدول ۲-۲ برخی از ویژگی‌های کامپوزیت و نانوکامپوزیت  $Al/SiC$  را در این تحقیق نشان می‌دهد [۲۲]. نتایج جدول ۲-۲ نشانگر افزایش تقریبی به ترتیب ۱۵٪ و ۱۸٪ برای مدول یانگ و سختی نانوکامپوزیت  $Al/SiC$  در مقایسه با کامپوزیت آن است.

جدول ۲-۲- خواص مکانیکی کامپوزیت و نانوکامپوزیت Al/SiC [۲۴].

Properties / Material	Al/SiC composite	Al/SiC nanocomposite
Young's modulus (GPa)	88.4	100
Hardness ( $H_V$ ) (Kg/mm <sup>2</sup> )	78	160

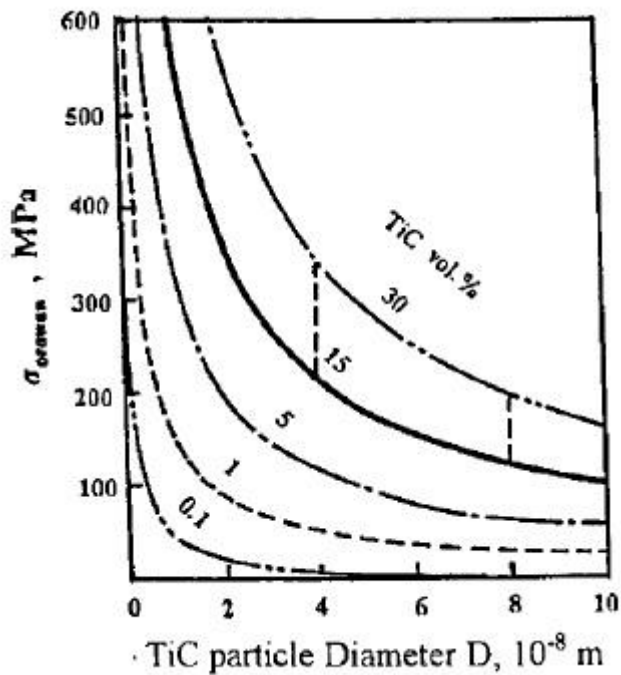


شکل ۲-۲- تأثیر میزان SiC بر سختی کامپوزیت Al/SiC [۲۲].



شکل ۲-۳- تأثیر میزان SiC بر روی مدول یانگ کامپوزیت Al/SiC [۲۲].

تنگ<sup>۱</sup> و همکارانش نشان دادند که، برای کامپوزیت Al تقویت شده با TiC، مقدار استحکام ( $\sigma$ ) با افزایش کسر حجمی یا کاهش اندازه ذرات TiC افزایش می‌یابد (شکل ۲-۴) [۲۳].



شکل ۲-۴ - افزایش استحکام نانوکامپوزیت Al/TiC با افزایش درصد حجمی یا کاهش اندازه ذرات فاز تقویت کننده [۲۳].

رن<sup>۲</sup> و چن<sup>۳</sup>، نیز کامپوزیت زمینه Al ۷۰۷۵ تقویت شده با نانو ذرات SiC (۵۰nm) به روش متالورژی پودر را ساختند. آنها نشان دادند که، این نانو کامپوزیت در مقایسه با کامپوزیتی که اندازه ذرات SiC در مقیاس میکرومتر بود، مقاومت به سایش بیشتری را از خود نشان می‌دهد [۲۴].

1- Tong  
2- ren  
3- chen

## ب- نوع تقویت کننده:

تا کنون تقویت کننده‌های مختلفی نظیر  $\text{SiC}$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{B}_4\text{C}$ ، نانولوله‌های کربنی و... جهت بهبود خواص کامپوزیت‌های فلزی پایه آلومینیوم به کار رفته اند که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارد. معمول ترین تقویت کننده‌ها برای کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی،  $\text{SiC}$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  می‌باشند که، به دلیل در دسترس بودن، هزینه کم و خواص مناسب مورد توجه فراوان قرار گرفته اند [۱۶].

تاثیر تقویت کننده بر روی خواص سایشی کامپوزیت وابستگی نزدیکی به نوع تقویت کننده (مانند  $\text{SiC}$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) و شکل تقویت کننده (مانند ذرات، الیاف و ویسکر) دارد. هاسکینگ<sup>۱</sup> و همکارانش گزارش داده اند که، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات  $\text{SiC}$  مقاومت به سایش بالاتری نسبت نمونه‌های تقویت شده با ذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  دارند [۲۵].

اخیرا مطالعات زیادی نیز در زمینه تهیه کامپوزیت‌های پایه آلومینیم با استفاده از دو نوع ذره تقویت کننده انجام شده است. هدف از این تحقیقات بهبود خواص و کاهش قیمت این نوع کامپوزیت‌ها است. یکی از معمول ترین کامپوزیت‌های ۳ تایی پایه آلومینیم کامپوزیت  $\text{Al}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}_p)$  می‌باشند. گورکان<sup>۲</sup> و باکر<sup>۳</sup> که رفتار سایشی  $\text{Al}/\text{SiC}_p$ ،  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{Al}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}_p)$  را بررسی کرده اند، نشان دادند که، کامپوزیت سه تایی رفتار سایشی مناسب تری را نسبت به کامپوزیت تقویت شده با  $\text{SiC}_p$  یا  $\text{Al}_2\text{O}_3$  از خود نشان می‌دهد [۲۶].

پارک<sup>۴</sup>، همچنین اظهار داشت، مقاومت سایشی کامپوزیت سه تایی  $\text{Al}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}_w)$  بسیار

بالاتر از کامپوزیت  $\text{Al}/\text{SiC}_w$  و  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  است [۲۷].

---

1- Hosking

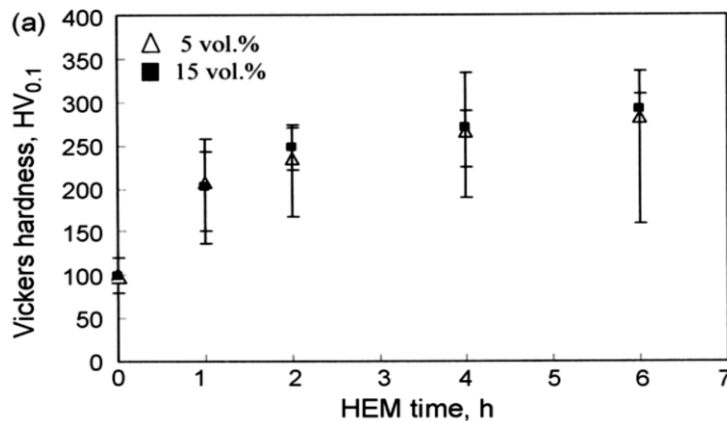
2- Gurcan

3- Baker

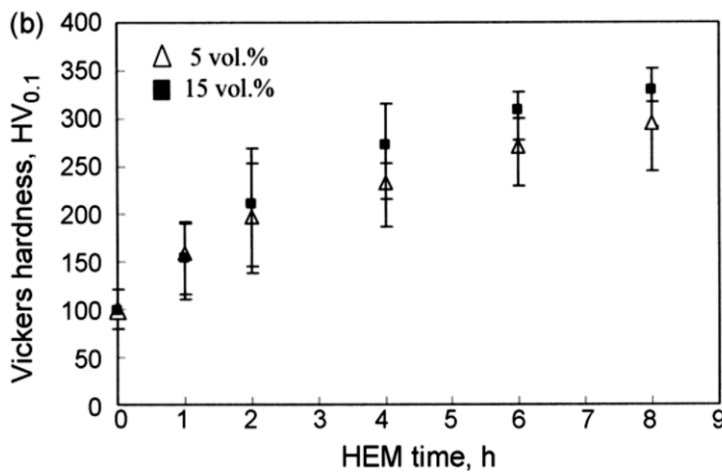
4- Park

### ج- شرایط آسیاب کاری:

ازدمیر<sup>۱</sup> و همکارانش کامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  و  $Al/SiC$  را با استفاده از آسیاب پراورژی سنتز کردند. آنها طی این پژوهش نشان دادند برای هر دو نمونه، همان گونه که در شکل‌های ۲-۵ و ۲-۶ نشان داده شده است، سختی کامپوزیت‌ها با افزایش زمان آسیاب کاری افزایش یافته است [۲۸].

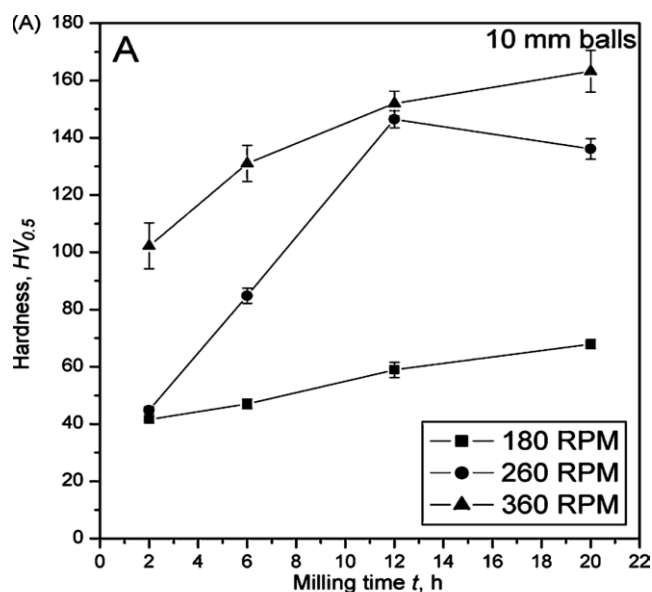


شکل ۲-۵- تأثیر زمان آسیاب کاری بر روی  $Al/SiC$  با در صد حجمی ۵٪ و ۱۵٪  $SiC$  [۲۸].



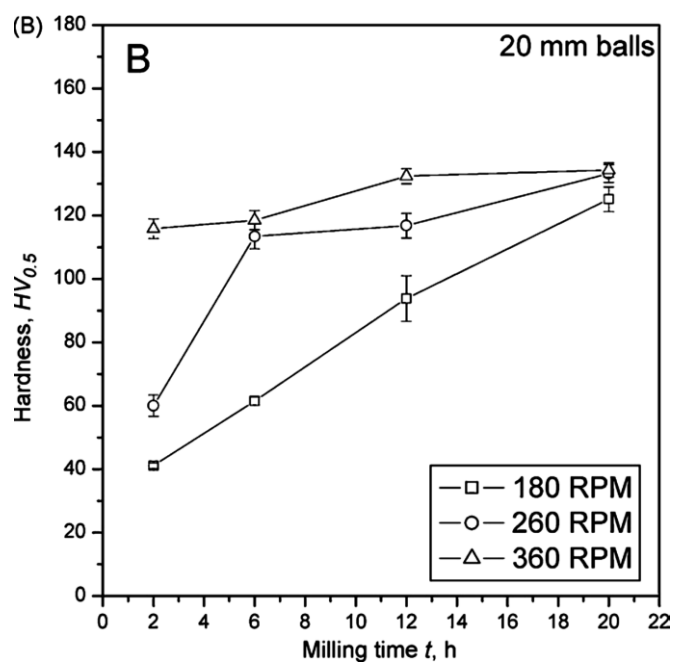
شکل ۲-۶- تأثیر زمان آسیاب کاری بر روی  $Al/Al_2O_3$  با در صد حجمی ۵٪ و ۱۵٪  $Al_2O_3$  [۲۸].

در طی مطالعه دیگری که توسط کولو<sup>۱</sup> و همکارانش صورت گرفت، شرایط مختلف آسیاب کاری با استفاده از آسیاب سیاره ای را برای نانو کامپوزیت Al/SiC بررسی کردند. آنها نشان دادند، با افزایش زمان آسیاب کاری و سرعت آسیاب کاری سختی نمونه‌ها افزایش یافته است. در شکل‌های ۲-۷ و ۲-۸ تأثیر این دو پارامتر بر سختی نمونه‌ها قابل مشاهده است. در این تصاویر همچنین تأثیر اندازه گلوله‌ها نیز نشان داده شده است. همان طور که نمودار نشان می‌دهد، برای سرعت‌های بالاتر، گلوله‌ها با سایز کوچک‌تر تأثیر بیشتری بر سختی نمونه‌ها داشته اند [۲۹].



شکل ۲-۷- تأثیر زمان و سرعت آسیاب کاری بر روی نانو کامپوزیت Al/SiC (سایز گلوله ۱۰mm) [۲۹].





شکل ۲-۸- تأثیر زمان و سرعت آسیاب کاری بر روی نانو کامپوزیت Al/SiC (سایز گلوله ۲۰ mm) [۲۹].

# طراحی و ساخت آسیاب

## پروانه ای

## مقدمه

اخیرا پیشرفت قابل توجهی در روش‌های تولید و تجاری‌سازی نانوذرات فلز-سرامیکی صورت گرفته‌است. فرآیندهای به کار گرفته شده جهت سنتز نانوساختارهای فوق بر پایه حالت جامد، مایع، گاز یا ترکیبی از آنها می‌باشد. فرآیند آسیاب کاری مکانیکی روشی مبتنی بر پایه حالت جامد است که به طور گسترده برای تولید مواد متنوعی مانند آلیاژهای آمورف، نانو ذرات فلزی و سرامیکی، مواد بین فلزی، کامپوزیت‌ها و... به کار می‌رود [۳۰-۳۲].

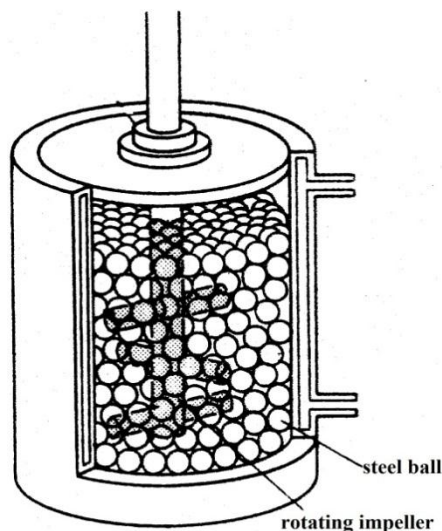
در روش آسیاب کاری مکانیکی از آسیاب‌هایی با مکانیزم عملکرد متفاوت مانند آسیاب‌های پروانه ای، سیاره‌ای، غلتشی، مغناطیسی و ... استفاده می‌شود.

روش آسیاب کاری مکانیکی به عنوان یک فرآیند غیر تعادلی که توانایی تولید ساختارهای نانو مقیاس را دارد، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۳۳].

## ۳-۱- آسیاب پروانه ای

آسیاب پروانه ای (یک آسیاب گلوله ای با قابلیت تولید انرژی‌های خیلی بالا) شامل یک محفظه استوانه ای و پره‌هایی در داخل آن است شکل (۳-۱). پره‌های داخلی وظیفه انتقال انرژی به گلوله‌ها را دارند. حرکت گلوله‌ها باعث ضربه زدن به پودر داخل محفظه می‌شوند.

هنگامی که سرعت چرخش بالا می‌رود، آهنگ سایش افزایش می‌یابد. در سرعت‌های بالا، نیروی گریز از مرکز بر نیروی گرانش غلبه می‌کند و گلوله‌ها به بدنه داخلی محفظه می‌چسبند. در این حالت عمل سایش متوقف می‌شود. در آسیاب پروانه ای، پودرهای خشک تحت نیروهای مختلفی مانند نیروهای برخورد، چرخشی، برشی و غلتشی می‌باشند. این نیروها به دلیل برخورد بین گلوله‌ها، بین گلوله‌ها و دیواره محفظه و بین گلوله‌ها و پره‌ها باعث کاهش اندازه پودر می‌شوند [۳۴].



شکل ۳-۱- تصویر شماتیکی از آسیاب پروانه ای، به همراه پره‌ها و گلوله‌های آن [۳۵].

### ۳-۲- طراحی و ساخت آسیاب پروانه ای

در انجام فرآیند این پایان نامه به دلیل محدودیت‌های شدید تحقیقاتی و همچنین برآوردن بخشی از نیازها در فرآیند آسیاب کاری، بر آن شدیم تا بخشی از سیستم‌های مورد نیازمان را طراحی کرده و بسازیم.

یکی از سیستم‌هایی که در جریان این پایان نامه اقدام به ساخت آن کردیم، آسیاب پروانه ای است. این آسیاب دارای بخش‌های مختلفی از قبیل قندانی ثابت، محفظه ازت مایع، محفظه خنک کننده آب، شیرهای ورودی و خروجی برای اتمسفر گاز، سیستم کنترلی لمسی و ... می‌باشد. شکل‌های ۲-۳ و ۳-۳ تصاویری از قسمت‌های مختلف این آسیاب را نشان می‌دهد.

موتور به کار رفته در این آسیاب موتور ۱/۵ اسب است که توانایی ایجاد دور موتور تا ۲۰۰۰ rpm را دارد. موتور با یک رابط به پروانه متصل می‌شود (شکل ۲-۳). این پروانه‌ها داخل قندانی قرار دارند و باعث چرخاندن گلوله‌ها در محفظه قندانی می‌شوند.



شکل ۳-۲- تصاویر اتصال موتور و پروانه‌های آسیاب پروانه ای



شکل ۳-۳- تصویری از سیستم کنترلی لمسی دستگاه آسیاب پروانه ای

در این آسیاب به دلیل ثابت بودن قندانی، قدرت ایجاد شده توسط موتور مستقیماً برای به هم زدن گلوله‌ها و پودر جهت خرد شدن استفاده می‌گردد و برای چرخش و یا لرزش یک محفظه سنگین علاوه بر گلوله‌ها و مواد استفاده نمی‌شود، و این یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های آسیاب پروانه ای است.

قندانی‌های ساخته شده برای این آسیاب از دو جنس فولادی و تفلونی می‌باشد (شکل ۳-۴). برای هر قندانی شیر ورودی و خروجی گاز در نظر گرفته شده است. علاوه بر این قندانی‌های فولادی، دارای لوله‌های مسی برای سیستم چرخش آب و ازت مایع می‌باشند. به همین دلیل می‌توان برای انجام فرآیندهای مکانوشیمیایی به راحتی از اتمسفر دلخواه استفاده کرد و برای جلوگیری از بالا رفتن دما در حین انجام آسیاب کاری از سیستم چرخش آب و ازت مایع استفاده کرد.

سیستم خنک کننده برای کنترل دمای آسیاب کاری، بویژه برای موادی نظیر آلومینیوم پیش بینی شده است، زیرا عمل آسیاب کاری این مواد به شدت گرما زا بوده و باعث ایجاد احتراق و حتی انفجار می‌گردد. به همین دلیل در بسیاری از موارد لازم بود تا عمل آسیاب کاری آلومینیوم تحت اتمسفر آرگون انجام شود (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۴- تصویر قندانی فولادی و تفلونی ساخته شده برای آسیاب پروانه ای



شکل ۳-۵- تصویری از قندانی به همراه لوله‌های مسی

تصویر ۳-۶ نمونه ای از پودر آلومینیوم آسیاب کاری شده است که، پس از قرار گرفتن در معرض هوا به شدت شعله ور شده و امکان انفجار برای آن وجود دارد. نمونه سمت چپ مربوط به قبل از آسیاب کاری و نمونه سمت راست مربوط به بعد از آسیاب کاری می‌باشد. علاوه بر این هنگام آسیاب کاری پودر کامپوزیتی Al/SiC در زمانهای طولانی به دلیل بالارفتن دما، آلومینیوم به بدنه قندانی و سطح گلوله‌ها می‌چسبد و جوش می‌خورد. بنا به این دلایل از سیستم خنک کننده یا اتمسفر آرگون برای پیشگیری از این خطر استفاده شده است.

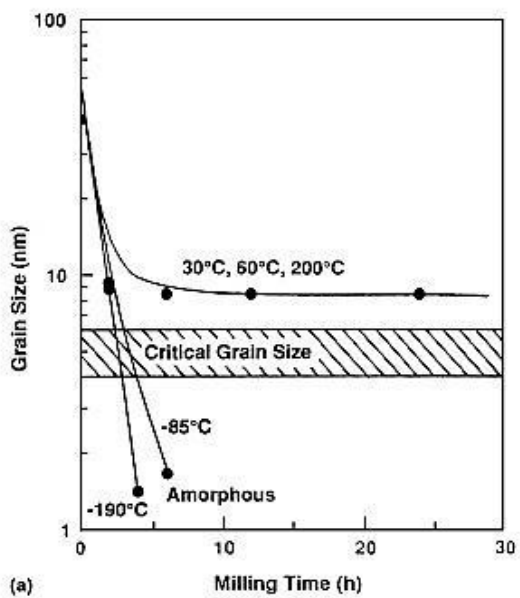


شکل ۳-۶- تصویری از پودر کامپوزیتی Al/SiC که بعد از آسیاب کاری سوخته است. نمونه سمت راست مربوط به بعد از آسیاب کاری و نمونه سمت چپ مربوط به قبل از آسیاب کاری می‌باشد.

برای اهدافی خاص، می‌توان از اتمسفرهای گوناگونی در طول آسیاب کاری استفاده کرد. اتمسفرهای نیتروژن یا آمونیاک به تولید نیتریدها [۳۶ و ۳۷]، اتمسفر هیدروژن به تولید هیدریدها [۳۸] و حضور هوا در محفظه به تولید اکسیدها و نیتریدها منجر می‌شود (به خصوص اگر پودرها ذاتا واکنش‌گر باشند).

درجه حرارت آسیاب کاری یکی از پارامترهای مهم در تعیین ساختار پودر است. با توجه به اینکه نفوذ در تشکیل فازهای آلیاژی، بدون توجه به فاز محلول نهایی (محلول جامد، بین فلزی، نانوکریستال، آمورف) نقش دارد، بنابراین انتظار می‌رود که دمای آسیاب کاری تأثیری مهم در هر سیستم آلیاژی خواهد داشت. با کاهش یا افزایش دما می‌توان تأثیر دمای آسیاب کاری روی میزان حلالیت جامد یا بررسی تشکیل فاز آمورف یا ساختار نانوکریستال در دماهای گوناگون را مطالعه کرد. برای مثال، شکل ۳-۷ تغییر اندازه دانه با زمان را در مورد CoZr نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در دمای نیتروژن مایع کاهش در اندازه دانه با شدت بیشتری نسبت به دمای بالاتر انجام می‌شود. منطقه‌هاشورخورده، منطقه ای را نشان می‌دهد که آلیاژ با اندازه دانه‌های زیر این مقدار، آمورف می‌شود [۳۹].





شکل ۳-۷- اندازه دانه CoZr برحسب زمان آسیاب کاری [۴۰].

این موارد نیز دلایل دیگر استفاده از سیستم خنک کننده ازت مایع و اتمسفر آرگون می باشد.

فصل چهارم

نتایج مطالعه نانو کامپوزیت های سنتز شده به روش

آسیاب کاری مکانیکی

## ۴-۱- مقدمه ای بر روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی

روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی را می‌توان به دو شیوه خارج از محل<sup>۱</sup> و در محل<sup>۲</sup> تقسیم بندی کرد. زمانی که تقویت کننده از خارج به زمینه اضافه شود، مواد کامپوزیتی به شیوه خارج از محل ساخته می‌شوند. سنتز کامپوزیت زمینه فلزی در روش در محل شامل تقویت کننده در داخل زمینه در طول فرآیند سنتز است.

روش‌های ساخت خارج از محل را می‌توان به فرآیندهای حالت جامد، حالت مایع و شبه جامد تقسیم بندی کرد. در بین روش‌های حالت جامد، متالورژی پودر و آسیاب کاری مکانیکی، متداول تر است. در این حالت به دلیل آنکه هر دو فاز به صورت فاز جامد باقی می‌مانند، نفوذپذیری خیلی کمتر می‌شود، بنابراین مشکلاتی از قبیل واکنش فصل مشترک و چسبندگی سطح به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. روش‌های حالت مایع را می‌توان به چهار گروه اصلی تزریق مایع<sup>۳</sup>، لرزشی<sup>۴</sup>، اسپری<sup>۵</sup>، حفره زایی التراسونیک انجمادی<sup>۶</sup> تقسیم بندی کرد. روش‌های شبه جامد نیز شامل ریخته گری شبه جامد<sup>۷</sup> و همزدن الکترومغناطیسی<sup>۸</sup> است.

روش‌های ساخت در محل به دو گروه زیر دسته بندی می‌شوند:

الف- روش‌های واکنشی<sup>۹</sup>: در این روش تقویت کننده در داخل زمینه فلزی از طریق یک واکنش گاز-مایع، مایع-مایع یا جامد-مایع سنتز می‌شود.

---

1- Ex-situ  
2- In-situ  
3- Infiltration  
4- Agitation  
5- Spraying  
6- Ultrasonic Cavitation Based Solidification  
7- Semi-Solid Casting  
8- Electromagnetic Stirring  
9- Reactive Routes

ب- روش‌های ریخت شناسی<sup>۱</sup>: فرآیندهای تغییر شکلی<sup>۲</sup> و انجماد مستقیم<sup>۳</sup> آلیاژهای یوتکتیک به این گروه تعلق دارند [۱۹].

در این پایان نامه از روش آسیاب کاری مکانیکی با استفاده از آسیاب سیاره ای پر انرژی برای سنتز کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها استفاده شده است.

#### ۲-۴- آسیاب سیاره ای پرانرژی

آسیاب‌های سیاره‌ای به دلیل مکانیزم عملکردشان که فرآیند آسیاب کاری را با انرژی بالا انجام می‌دهند برای تولید نانوذرات فلزی، سرامیکی، کامپوزیت، نانوکامپوزیت‌ها و... گزینه‌های مناسبی هستند. دلیل نام‌گذاری این آسیاب، حرکت سیاره‌ای مانند قندانی آن است. که علاوه بر حرکت چرخشی انتقالی دارای حرکت وضعی نیز می‌باشد [۳۳].

#### ۳-۴- مشخصات آسیاب سیاره ای ساخته شده

دستگاه مورد نظر از نوع آسیاب سیاره‌ای دو قندانی می‌باشد. سیستم انتقال قدرت استفاده شده برای هر دو حرکت چرخشی انتقالی و وضعی، سیستم چرخ دنده می‌باشد. برای مجموعه یک موتور rpm ۱۸۰۰ با توان ۱.۵ اسب در نظر گرفته شده است.

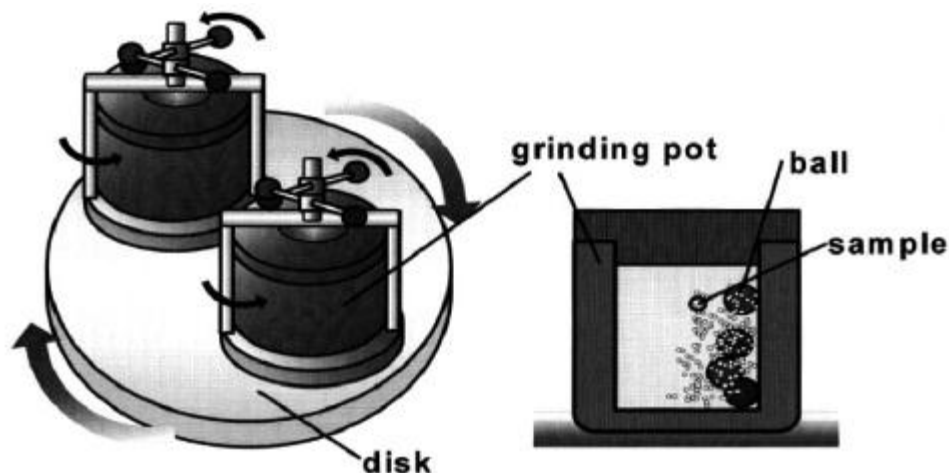
---

1- Morphological

2- Deformation Processed

3- Directional Solidification

با این سیستم، می‌توانیم برای هر قندانی به دور حداکثر ۸۰۰ rpm حول محور خود (چرخشی وضعی) و ۴۰۰ rpm حول مرکز جرم (چرخشی انتقالی) رسید. شکل ۴-۱ تصویری شماتیک از حرکت قندانی‌ها و صفحه چرخان آن می‌باشد.



شکل ۴-۱ - تصویری شماتیک از حرکت قندانی‌ها و صفحه چرخان [۴۰].

دور موتور توسط یک معکوس کننده<sup>۱</sup> قابل تنظیم است. همچنین سیستم مجهز به یک تایمر به منظور قطع کار دستگاه در زمان مورد نظر و یک شمارنده دور به منظور نمایش دور کاری مجموعه می‌باشد. یک سیستم خنک کننده نیز برای کاهش دمای موتورها و مدارات الکتریکی در آسیاب تعبیه شده است.

<sup>۱</sup> - Inverter

## ۴-۴- پارامترهای تأثیر گذار در فرآیند آسیاب کاری

پارامترهای مهم تأثیر گذار بر فرآیند آسیاب کاری سرعت آسیاب کاری، زمان آسیاب، نسبت وزنی گلوله به پودر (BPR)<sup>۱</sup>، اتمسفر آسیاب کاری، نوع، اندازه و توزیع اندازه ی عامل آسیاب کاری، جنس قندانی و ... می‌باشند [۳۳].

در ادامه با توضیح روند آسیاب کاری‌های انجام شده، تأثیر هر یک از این پارامترها بررسی خواهد شد.

### ۴-۴-۱- زمان آسیاب کاری:

#### آماده سازی نمونه برای انجام آسیاب کاری:

مقدار ی از پودر سیلیکون کاربید<sup>۲</sup> (اندازه میانگین ذرات پودر ۵۰ میکرومتر) و تعدادی گلوله با توجه به BPR وزن شده و ابتدا گلوله‌ها و سپس پودرها را در قندانی ریخته و درب قندانی محکم بسته می‌شود. قندانی را در قسمت نگهدارنده دستگاه قرار داده و سرعت و زمان مورد نظر تنظیم می‌گردد. در جدول ۴-۱ پارامترهای آسیاب کاری نمونه S1 و S2 آمده است.

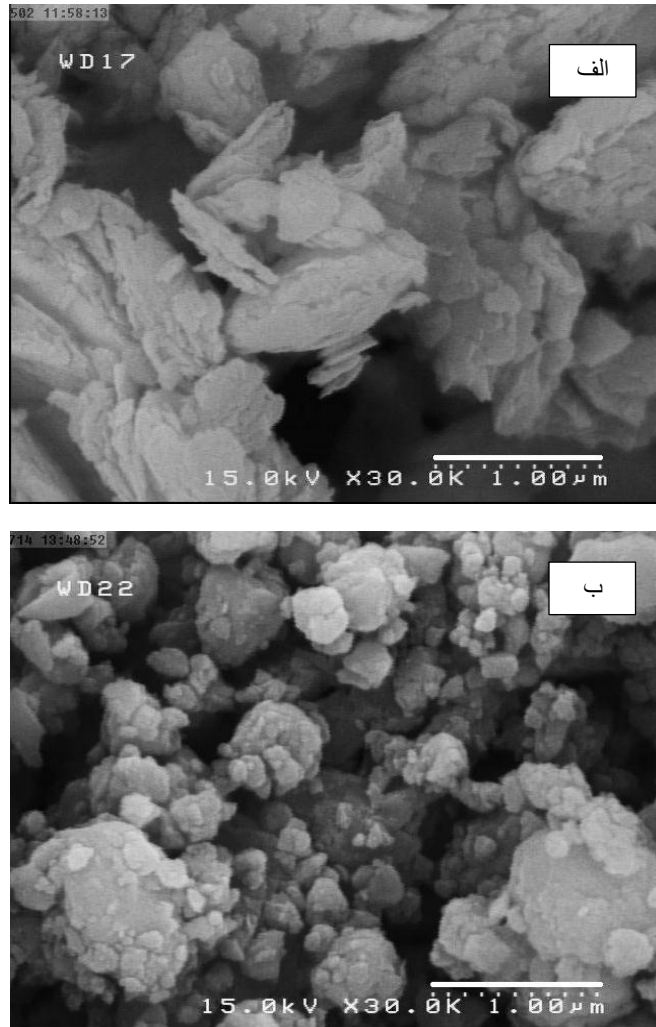
جدول ۴-۱- پارامترهای آسیاب کاری نمونه‌های S1 و S2

کد نمونه	زمان آسیاب کاری (ساعت)	سرعت (rpm)	BPR	سایز گلوله (mm)	وزن پودر (g)	جنس قندانی	جنس گلوله	اتمسفر
S1	۴	۴۰۰	۲۰:۱	۱۵	۵	فولاد	فولاد	هوا
S2	۸	۴۰۰	۲۰:۱	۱۵	۵	فولاد	فولاد	هوا

<sup>۱</sup> - Ball-to Powder weight Ration

<sup>۲</sup> - Silicon Carbide

شکل ۴-۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM<sup>۱</sup>) مربوط به نمونه‌های S1 و S2 می‌باشد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش زمان آسیاب کاری اندازه ذرات کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۲- تصویر SEM مربوط به نمونه الف (S1 (۴ ساعت آسیاب کاری و ب) S2 (۸ ساعت آسیاب کاری)). تصاویر نشان می‌دهد با افزایش زمان آسیاب کاری، میانگین اندازه ذرات کاهش یافته است.

<sup>1</sup>- Scanning Electron Microscope

در هنگام آسیاب کاری پر انرژی، ذرات مرتبا تحت جوش سرد، شکست، و جوش دوباره قرار می‌گیرند. در هنگام برخورد دو گلوله فولادی به یکدیگر، مقداری پودر بین آنها گیر می‌افتد. تغییر شکل پلاستیک ذرات پودر در نتیجه ضربات، منجر به کار سخت و شکست آنها می‌شود. سطوح جدید عامل جوش خوردن ذرات به یکدیگر و ایجاد ذرات بزرگ تر هستند. از آن جایی که در مراحل نخستین آسیاب کاری، ذرات نرم می‌باشند، تمایل آنها به جوش و تشکیل ذرات بزرگ بالا است. با ادامه تغییر شکل، ذرات کار سخت شده و به وسیله مکانیزم‌هایی چون شکست خستگی و یا ریز شدن پوسته‌های شکننده، خرد می‌شوند. در این مرحله، تمایل به شکست بر جوش سرد غلبه می‌کند [۳۵].

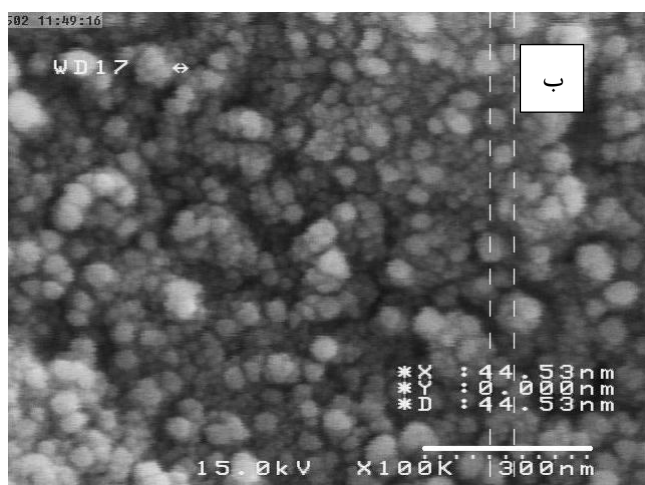
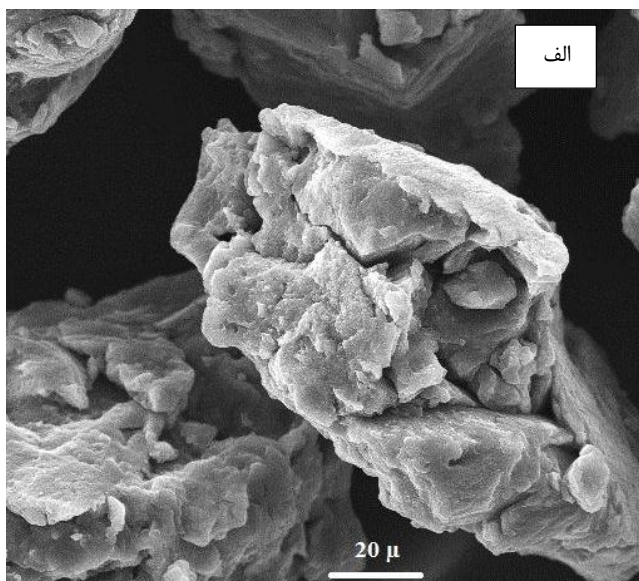
#### ۴-۴-۲- سرعت آسیاب کاری

پودر کامپوزیتی Al/SiC که با سرعت‌های مختلف آسیاب کاری شده اند (جدول ۴-۲)، تصاویر SEM در شکل ۴-۲ نشان داده شده است و این تصاویر معرف شکل‌گیری نانو ذرات در اثر عمل آسیاب کاری در سرعت ۵۰۰ rpm است. و همان طور که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است، سایز نانو ذرات شکل گرفته در حدود ۴۰ nm تا ۸۰ nm است و سایز متوسط ذرات در حدود ۵۵ nm است. در واقع با افزایش زمان آسیاب کاری انرژی بیشتری به پودرها وارد می‌شود و این امر باعث کاهش اندازه ذرات می‌شود.

جدول ۴-۲- پارامترهای آسیاب کاری نمونه‌های CAS1 و CAS2

کد نمونه	زمان آسیاب کاری (ساعت)	سرعت (rpm)	BPR	سایز گلوله (mm)	وزن پودر (g)	جنس قندانی	جنس گلوله	اتمسفر
CAS1	۲۰	۲۰۰	۲۰:۱	۲۰	۵	فولاد	فولاد	هوا
CAS2	۲۰	۵۰۰	۲۰:۱	۲۰	۵	فولاد	فولاد	هوا





شکل ۴-۳- تصویر SEM مربوط به نمونه الف) CAS1 (سرعت آسیاب کاری ۲۰۰rpm) و ب) CAS2 (سرعت آسیاب کاری ۵۰۰rpm). تصاویر نشان می‌دهد که، با افزایش سرعت آسیاب کاری میانگین اندازه ذرات کاهش یافته است.

#### ۴-۳-۴- جنس قندانی

یکی از عواملی که بر اندازه پودر نهایی و همچنین میزان ناخالصی پودر تاثیر گذار است، جنس قندانی می‌باشد. برای مثال هنگامی که از قندانی تفلونی برای آسیاب کاری ذرات SiC استفاده می‌شود، در

مقایسه با زمانی که از قندانی فولادی استفاده می‌شود، ناخالصی که از بدنه وارد پودر می‌شود، کمتر است. اما از آنجایی که قندانی تفلونی سختی زیادی ندارد، برای آسیاب کاری SiC که در مقایسه با تفلون خیلی سخت تر است، مناسب نیست. شکل ۴-۲-۴ و ۴-۴ تصاویر SEM مربوط به آسیاب کاری SiC (نمونه-های S2 و S3) می‌باشند که در شرایط یکسان (جدول ۴-۱ و ۴-۳) آسیاب کاری شده اند، تنها پارامتری که متفاوت است، جنس قندانی است. همان طور که مشاهده می‌شود، اندازه ذرات زمانی که از قندانی تفلونی استفاده شده است، نسبت به زمانی که از قندانی فولادی استفاده می‌شود، بزرگتر است. البته مشکلی که در استفاده از قندانی فولادی وجود دارد، به دلیل سخت تر بودن SiC نسبت به فولاد، ناخالصی آهن وارد پودرهای آسیاب شده می‌شود.

جدول ۴-۳- پارامترهای آسیاب کاری نمونه S3

کد نمونه	زمان آسیاب کاری (ساعت)	سرعت (rpm)	BPR	سایز گلوله (mm)	وزن پودر (g)	جنس قندانی	جنس گلوله	اتمسفر
S3	۸	۴۰۰	۲۰:۱	۱۵	۵	تفلونی	فولادی	هوا



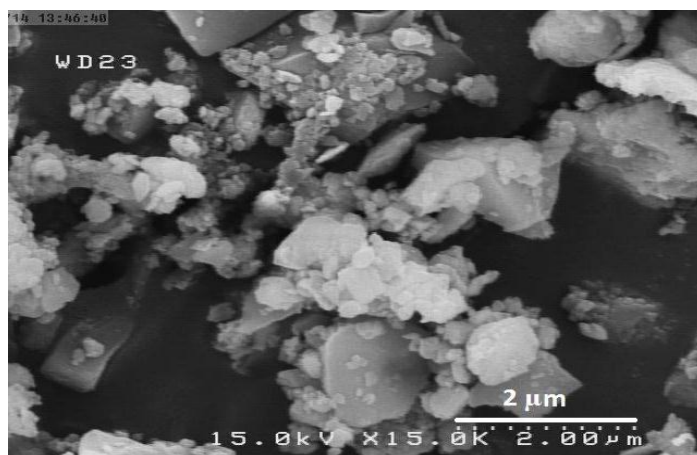
شکل ۴-۴- تصویر SEM مربوط به نمونه S3 که در قندانی تفلونی آسیاب کاری شده است.

#### ۴-۴-۴- نسبت وزنی گلوله به پودر:

نسبت وزنی گلوله به پودر یکی از مهم ترین متغیرهای فرآیند آسیاب کاری است. BPR تأثیر زیادی روی زمان لازم برای رسیدن به یک فاز ویژه در آسیاب کاری پودر دارد. BPR بالاتر منجر به کاهش زمان لازم برای رسیدن به فاز مورد نظر می‌شود [۳۵]. همان طور که تصاویر SEM (شکل ۴-۵ و ۴-۲-ب)، برای آسیاب کاری SiC (نمونه S2 و S4) در دو شرایط مشابه (جدول ۴-۱ و ۴-۴) با BPR متفاوت نشان می‌دهد، با افزایش BPR منجر به کاهش اندازه ذرات می‌شود. نمونه S2 با نسبت وزنی گلوله به پودر ۲۰:۱ و نمونه S4 با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ آسیاب کاری شده اند. در یک BPR بالا به خاطر افزایش در سهم وزنی گلوله‌ها، تعداد برخورد در واحد زمان افزایش یافته و در نتیجه انرژی بیشتری به پودر منتقل می‌شود.

جدول ۴-۴- پارمترهای آسیاب کاری نمونه S4

کد نمونه	زمان آسیاب کاری (ساعت)	سرعت (rpm)	BPR	سایز گلوله (mm)	وزن پودر (g)	جنس قندانی	جنس گلوله	اتم‌سفر
S4	۸	۴۰۰	۱۰:۱	۱۵	۵	فولادی	فولادی	هوا



شکل ۴-۵- تصویر SEM مربوط به نمونه S4 که با BPR، ۱۰:۱ آسیاب کاری شده است.

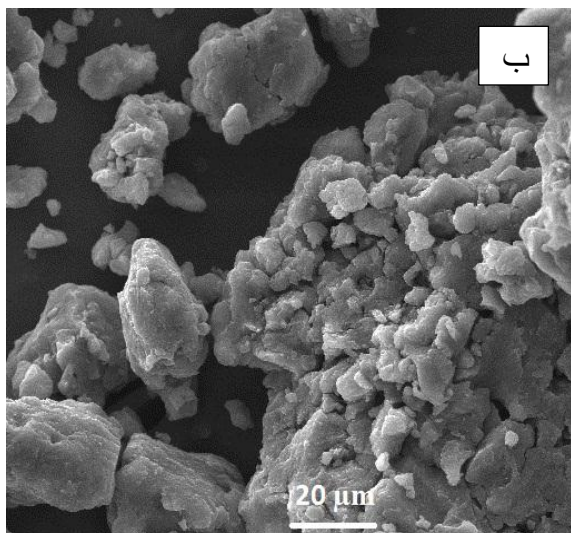
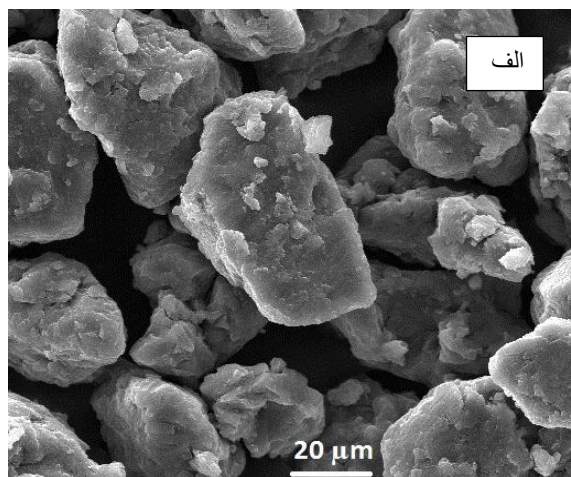
#### ۴-۵- اندازه و توزیع اندازه ی عامل آسیاب کاری:

دانشیته عامل ساینده باید به حد کافی بالا باشد تا امکان ایجاد نیروی ضربه ای و سایشی کافی به وجود آید. برای جلوگیری از آلودگی، مشابه بودن جنس محیط و گلوله‌ها با پودرهایی که آسیاب می‌شوند، همیشه مطلوب است. اندازه گلوله‌ها نیز بر روی بازده آسیاب کاری مؤثر است [۳۵].

شکل‌های ۴-۶ تصویر SEM مربوط به آسیاب کاری Al-15%wt SiC است، که در شرایطی مطابق جدول ۴-۵ با سایزها و اندازه‌های مختلف گلوله‌های فولادی آسیاب کاری شده اند. تصاویر حاکی از آن است، که زمانی از گلوله‌ها با اندازه‌های گوناگون استفاده می‌شود، خردایش بهتر است. زمانی که از گلوله‌ها با اندازه‌های گوناگون استفاده می‌شود، میانگین اندازه ذرات ۵ میکرومتر است، در حالی که، وقتی فقط از یک نوع گلوله استفاده شده است، میانگین اندازه ذرات ۲۵ میکرومتر بوده است. استفاده از گلوله‌هایی با اندازه‌های گوناگون، باعث ایجاد بیشترین انرژی برخورد می‌شود. همچنین در این حالت مقدار جوش سرد و مقدار پودر چسبیده بر روی گلوله‌ها کمینه می‌شود.

جدول ۴-۵- پارامترهای آسیاب کاری نمونه CAS3 و CAS4

کد نمونه	زمان آسیاب کاری (ساعت)	سرعت (rpm)	BPR	سایز گلوله (mm)	وزن پودر (g)	جنس قندانی	جنس گلوله	اتمسفر
CAS3	۳۰	۳۰۰	۳۰:۱	۱۵	۵	فولادی	فولادی	هوا
CAS4	۳۰	۳۰۰	۳۰:۱	۶ و ۱۵	۵	فولادی	فولادی	هوا

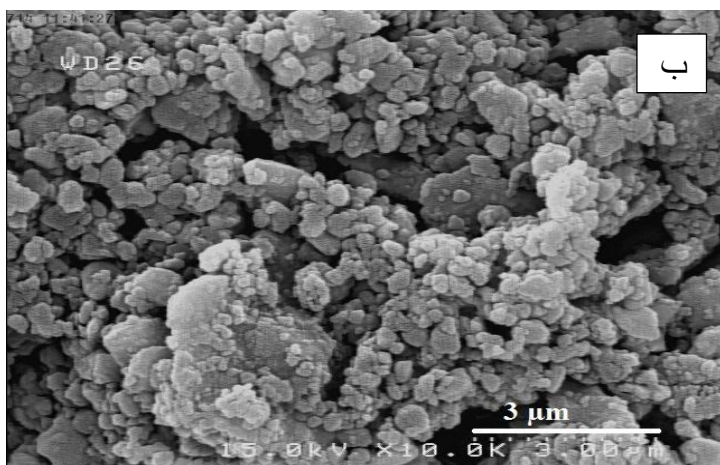
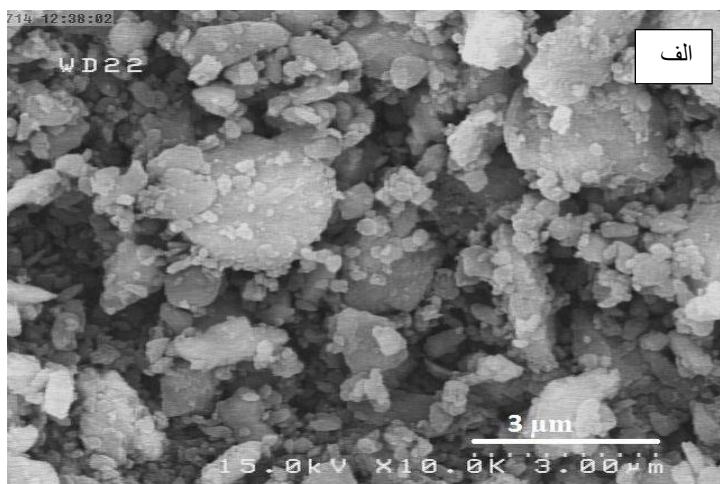


شکل ۴-۶- تصاویر SEM مربوط به نمونه الف (CAS3 و ب) CAS4. این تصاویر نشان می‌دهد که با استفاده از گلوله با سایزهای مختلف میانگین اندازه ذرات کاهش یافته است.

همچنین در شکل ۴-۷ که تصاویر SEM مربوطه به آسیاب کاری پودر کامپوزیتی Al/SiC (نمونه CAS5 و CAS6) که پارامترهای آسیاب کاری آنها در جدول ۴-۶ آمده است، نیز نشان می‌دهد، هنگامی که از گلوله‌هایی با اندازه ی گوناگون استفاده می‌شود، میانگین اندازه ذرات کاهش یافته است.

جدول ۴-۶- پارامترهای آسیاب کاری نمونه CAS3 و CAS4

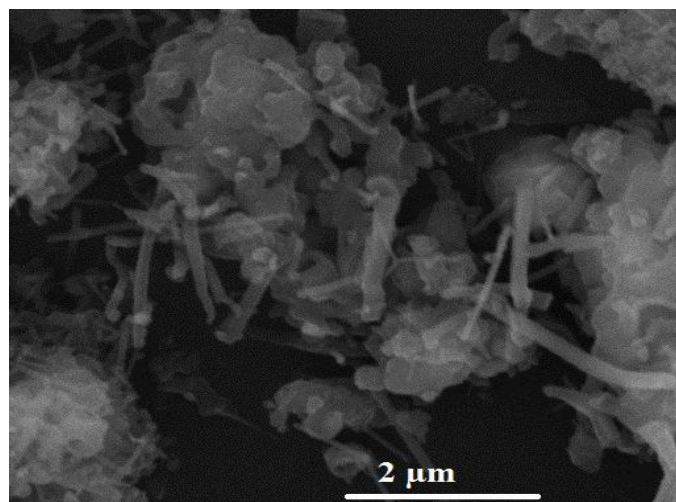
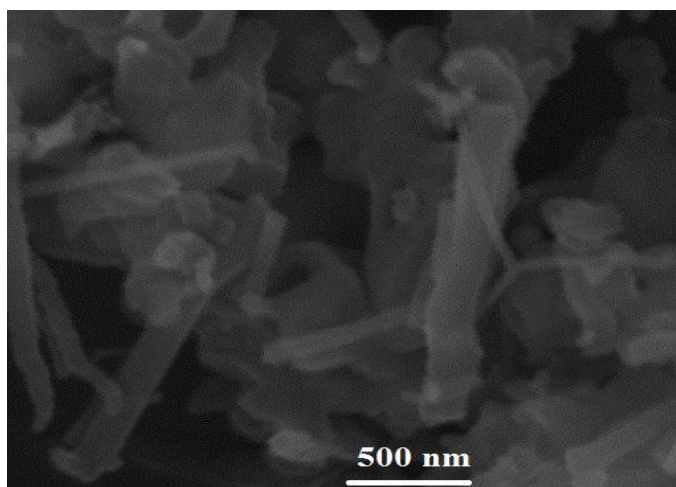
کد نمونه	زمان آسیاب کاری (ساعت)	سرعت (rpm)	BPR	سایز گلوله (mm)	وزن پودر (g)	جنس قندانی	جنس گلوله	اتمِسفر
CAS5	۱۰	۴۰۰	۲۰:۱	۱۵	۵	فولادی	فولادی	هوا
CAS6	۱۰	۴۰۰	۲۰:۱	۶ و ۱۵	۵	فولادی	فولادی	هوا



شکل ۴-۷- تصاویر SEM مربوط به نمونه الف) CAS5 و ب) CAS6. این تصاویر نشانگر آن است، که با استفاده از گلوله‌های با سایزهای متفاوت اندازه نهایی ذرات آسیاب کاری شده کاهش می‌یابد.

#### ۷-۴-۴- افزودن اتانول در فرآیند آسیاب کاری

پودر کامپوزیتی Al/SiC (نمونه CAS5 و CAS7) در شرایط یکسان (جدول ۷-۴ و ۶-۴) همراه با اتانول آسیاب کاری شدند. همان طور که تصاویر SEM شکل ۸-۴ نشان می‌دهد، در نمونه CAS7 (شکل ۷-۴) که ۲۰ ساعت آسیاب کاری شده است، نسبت به نمونه CAS5 (شکل ۶-۴ الف) که ۱۰ ساعت آسیاب کاری شده است، نانو سوزن‌هایی تشکیل شده است.



شکل ۸-۴- تصویر SEM نمونه CAS7 آسیاب کاری شده با اتانول. این تصاویر نشان می‌دهد که با افزایش زمان آسیاب کاری نمونه‌ها در حضور اتانول نانو سوزن‌هایی شکل گرفته است.

جدول ۴-۷- پارامترهای آسیاب کاری نمونه CAS7

کد نمونه	زمان آسیاب کاری (ساعت)	سرعت (rpm)	BPR	سایز گلوله (mm)	وزن پودر (g)	جنس قندانی	جنس گلوله	اتمسفر
CAS7	۲۰	۴۰۰	۲۰:۱	۱۵	۵	فولادی	فولادی	هوا

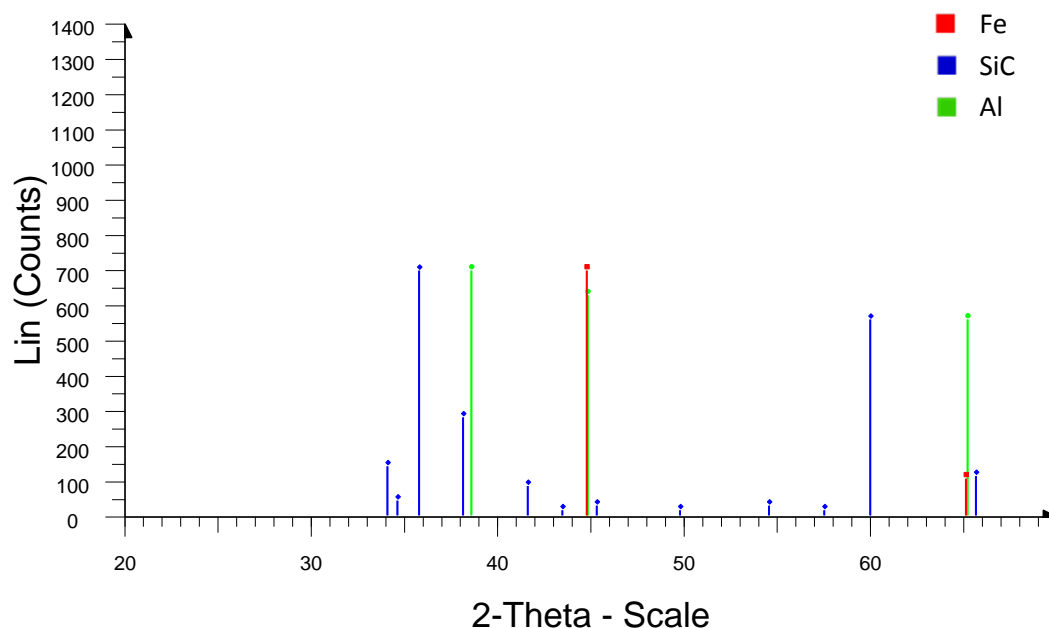
#### ۴-۵- آلودگی پودر

یکی از مهم ترین مسائل در فرآیند آسیاب کاری نوع و مقدار ناخالصی‌هایی است که وارد پودر شده و آن را آلوده می‌کند. عواملی از قبیل اندازه کوچک ذرات پودر، وجود سطح بزرگ و شکل گیری سطوح جدید، اتمسفر آسیاب کاری، جنس قندانی و گلوله و... باعث آلودگی پودر می‌شوند.

اتمسفر آسیاب کاری، بر روی آلودگی پودر (ایجاد فازهای جدید در اثر فرآیندهای مکانوشیمیایی) تأثیر گذار است، به همین دلیل گاهی اوقات لازم است که، پودرها در محفظه تحت خلاء و یا گاز خنثی مثل آرگون یا هلیوم آسیاب شوند. آرگون خالص مناسب ترین اتمسفر برای جلوگیری از اکسیداسیون و یا آلودگی پودر است [۳۵]. تصاویر پراش پرتو X ( $XRD^1$ ) شکل ۴-۹، نمونه CAS1 نشان می‌دهد تنها ناخالصی که وجود دارد، ناخالصی آهن می‌باشد که، از بدنه قندانی یا گلوله‌ها حین عمل آسیاب کاری وارد نمونه‌ها شده است.

<sup>1</sup> - X-Ray Diffraction





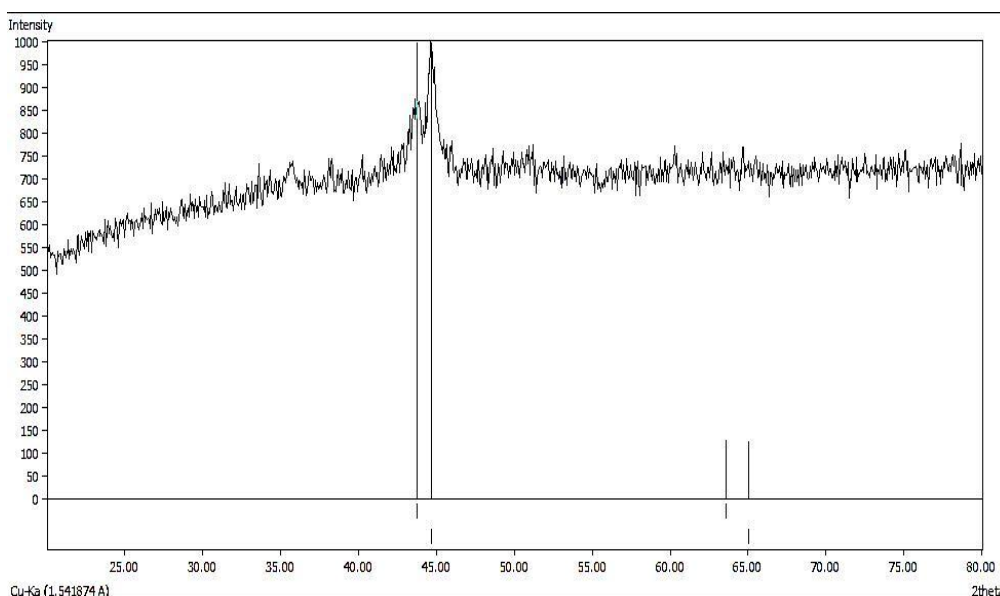
شکل ۴-۹- نمودار پراش XRD، نمونه CAS1 در تصویر علاوه بر پیک‌های مربوط به دو ترکیب اصلی Al و SiC پیک‌های ناخالصی آهن نیز مشاهده می‌گردد.

در هنگام آسیاب کاری، ذرات پودر بین عامل ساینده محبوس شده و متحمل تغییر شکل پلاستیک شدیدی می‌گردند و سطوح جدید به دلیل شکست ذرات پودر ایجاد می‌شوند. علاوه بر این، برخوردها بین عامل ساینده و محفظه و هم‌چنین بین گلوله‌ها نیز به وجود می‌آیند. نتیجه همه‌ی این تأثیرات، منجر به سایش و ترک عامل ساینده و محفظه گشته و در نتیجه ناخالصی وارد پودر می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که، میزان آلودگی با افزایش انرژی آسیاب کاری و هم‌چنین استفاده از BPR و سرعت آسیاب بالاتر، بیشتر می‌شود.

همچنین هنگام آسیاب کاری SiC (نمونه S7) تحت شرایط جدول ۴-۸ نیز مقداری ناخالصی آهن وارد پودر در حین آسیاب کاری شده است. در شکل ۴-۱۰ نمودار پراش XRD وجود ناخالصی آهن را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۸- پارامترهای آسیاب کاری نمونه S7

کد نمونه	زمان آسیاب کاری (ساعت)	سرعت (rpm)	BPR	سایز گلوله (mm)	وزن پودر (g)	جنس قندان	جنس گلوله	اتمسفر
S7	۳۰	۴۰۰	۴۰:۱	۱۰ و ۱۵،۶	۵	فولادی	فولادی	هوا



شکل ۴-۱۰- نمودار پراش XRD نمونه S7، پیک‌های مشخص شده مربوط به ناخالصی آهن است.

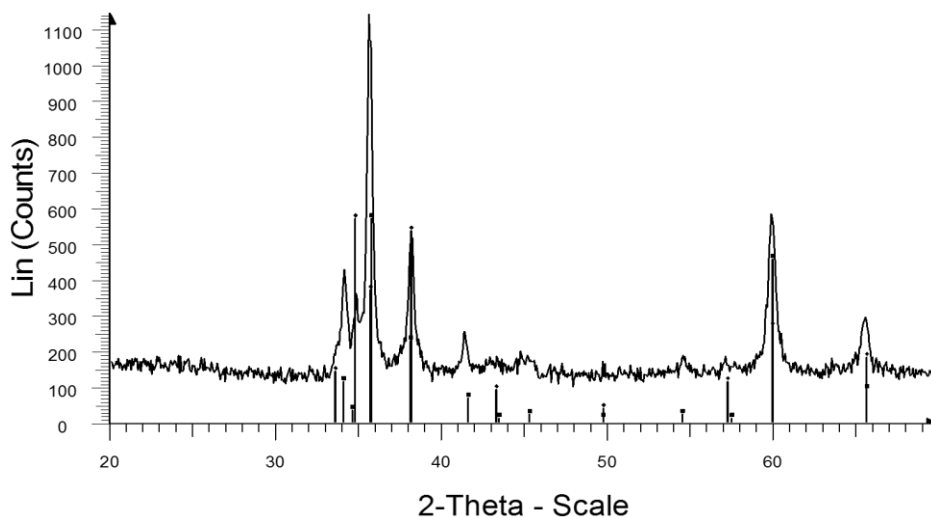
یک راه حل برای کاهش آلودگی، استفاده از گلوله و محفظه ای با جنس مشابه پودری که آسیاب می‌شود، است. البته استفاده از این روش در بسیاری از سیستم‌ها، به دلیل نبودن گلوله و محفظه مخصوص که مشابه با جنس پودر باشد، مشکل است. یک راه ساده برای کاهش آلودگی آن است که، ابتدا مقداری پودر را آسیاب کاری کرده و سپس آن را خارج و دوباره پودر جدید را وارد سیستم آسیاب کاری کنیم، تا بخشی از آلودگی به همراه پودر اول از سیستم خارج شود. با تکرار این عمل آلودگی از عامل

ساینده و محفظه به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از محفظه و عامل ساینده سخت تر از پودر یکی از اصولی است که باید رعایت شود تا آلودگی ناشی از آن کاهش یابد [۳۵].

#### ۴-۵-۱- اسید شویی

برای حذف آهن، پودر SiC به روش زیر اسید شویی شد:

مقداری از پودر SiC را در محلول HCl (۳۰ cc)،  $\text{HNO}_3$  (۱۰ cc) و آب مقطر (۴۰ cc) ریخته و سپس به مدت ۲۰ دقیقه و در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد بر روی همزن مغناطیسی قرار داده شد. سپس محلول مورد نظر را از صافی عبور داده و مقدار SiC که بر روی کاغذ صافی باقی مانده است، چند بار با آب شستشو داده می‌شود. همان طور که در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است، تصویر XRD حاکی از آن است، که ناخالصی آهن بعد از اسید شویی حذف شده است.



شکل ۴-۱۱- تصویر XRD نمونه S7 بعد از اسید شویی، پیک‌ها مربوط به SiC است.

#### ۴-۵- سنتز کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها

#### ۴-۵-۱- آسیاب کاری پودرهای کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی

درصد وزنی از پودر کامپوزیتی مطابق جدول ۴-۹ و نانو کامپوزیتی مطابق جدول ۴-۱۰ وزن شد. بر اساس شرایط آسیاب کاری ذکر شده در جدول ۴-۱۱ همه پودرهای کامپوزیتی تحت شرایط کاملا یکسان آسیاب کاری شدند. لازم به ذکر است که میانگین اندازه ذرات SiC، ۵۰ میکرومتر، اندازه ذرات Al، ۶۰ میکرومتر و آلومینا نیز در دو مقیاس ۵۰ میکرومتر و ۸۰ نانومتر بوده است.

جدول ۴-۹- درصد وزنی نمونه‌های کامپوزیتی

کد نمونه	درصد وزنی نمونه‌ها
S10	Al/ 10% wt SiC $\mu$
S15	Al/15% wt SiC $\mu$
S20	Al/20% wt SiC $\mu$
A5	Al/5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\mu$
A7	Al/7% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\mu$
A10	Al/10% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\mu$
A15	Al/ 15% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\mu$
AS7.5	Al/7.5% wt SiC $\mu$ -7.5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\mu$
AS3.5	Al/3.5% wt SiC $\mu$ -3.5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\mu$
AS2.5	Al/2.5% wt SiC $\mu$ -2.5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\mu$
A3.5-S1.5	Al/1.5% wt SiC $\mu$ -3.5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\mu$
A1.5-S3.5	Al/3.5% wt SiC $\mu$ -1.5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\mu$

جدول ۴-۱۰- درصد وزنی نمونه‌های نانوکامپوزیتی

کد نمونه	درصد وزنی نمونه
A5n	Al/5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> n
A7n	Al/7% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> n
A10n	Al/10% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> n
A15n	Al/ 15% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> n
AS7.5n	Al/ 7.5% wt SiC <sub>μ</sub> -7.5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> n
AS3.5n	Al/ 3.5% wt SiC <sub>μ</sub> -3.5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> n
AS2.5n	Al/ 2.5% wt SiC <sub>μ</sub> -2.5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> n
A3.5n-S1.5	Al/ 1.5% wt SiC <sub>μ</sub> -3.5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> n
A1.5n-S3.5	Al/ 3.5% wt SiC <sub>μ</sub> -1.5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> n

جدول ۴-۱۱- شرایط آسیاب کاری پودرهای کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی

زمان آسیاب کاری (ساعت)	سرعت (rpm)	BPR	سایز گلوله (mm)	وزن پودر (g)	جنس قندانی	جنس گلوله	اتم‌سفر
۱	۲۰۰	۲:۱	۲	۵	تفلونی	فولادی	هوا

#### ۴-۵-۲- حذف پلیمر از پودرهای آسیاب کاری شده

از آنجایی که پودرهای کامپوزیتی در قندانی تفلونی آسیاب کاری شدند، این امکان وجود دارد که، در حین آسیاب کاری مقداری از بدنه قندانی خورده شده و وارد پودرهای آسیاب کاری شود. برای حذف آن، پودرهای کامپوزیتی را به مدت ۱/۵ ساعت، در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  و با شیب دمایی  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  در کوره تیویی قرار داده شد.

#### ۴-۵-۳- آماده کردن پلی ونیل الکل (PVA)

برای شکل دهی بهتر پودرهای کامپوزیتی نیاز است تا از چسب PVA استفاده کنیم. بدین منظور PVA را به شرح زیر آماده شد:

محلول ۵٪ وزنی پودر PVA و آب مقطر را در دمای  $60-70^{\circ}\text{C}$  را بر روی همزن مغناطیسی قرار داده شد. این محلول باید آنقدر بر روی همزن مغناطیسی گرما داده شود تا کاملاً در آب مقطر حل شود و یک محلول یکنواخت بدست آید.

#### ۴-۵-۴- فشرده سازی پودرهای کامپوزیتی

به پودرهای کامپوزیتی بعد از حذف پلیمر از آنها به مقدار معین PVA و آب مقطر اضافه شد، سپس خشک شدند. در نهایت پودرهای خشک شده را در قالب پرس (شکل ۴-۱۲) ریخته و تحت فشارهای مختلف و با سرعت  $1\text{ mm/s}$  پرس شدند. دستگاه پرس مورد استفاده، پرس هیدرولیک  $150$  تن بوده است.

---

<sup>1</sup>- Poly Venil Alcohol



شکل ۴-۱۲- تصویری از قالب پرس که برای پرس نمونه‌ها استفاده شده است.

#### ۴-۵-۵- سینتر کردن قرص‌های پرس شده

پودرهای کامپوزیتی فشرده شده که به صورت قرص‌هایی به قطر ۲۵ mm و ضخامت ۲-۳ mm در آمده اند (شکل ۴-۱۳)، را تحت دمای  $500^{\circ}\text{C}$ ، به مدت ۲ ساعت و شیب دمایی  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  در کوره تیوبی تحت خلاء قرار دادیم. اتمسفر مورد استفاده برای سینتر کردن نمونه‌ها گاز آرگون بوده است.



شکل ۴-۱۳- تصویری از کامپوزیت سنتز شده که به شکل قرص است.

## ۴-۶- تحلیل نمونه‌های سنتز شده

### ۴-۶-۱- اندازه‌گیری سختی

کیفیت موادی که در طراحی قطعات صنعتی به کار می‌رود، بیش از همه به خواص مکانیکی بستگی خواهد داشت. اطلاع یافتن از ساختار مواد برای طراحی یک قطعه امری لازم و قطعی است تا از هرگونه تغییر شکل بیش از حد ماده و شکست در قطعه جلوگیری به عمل آید. عکس العمل مواد جامد در مقابل نیروها، گشتاورها و یا به طور کلی هر نوع تنش‌های خارجی وارد بر آن، اعم از استاتیکی و یا دینامیکی، در شرایط خاص محیط کار یا محیط آزمایش، رفتار یا خواص مکانیکی نامیده می‌شود. سختی یک مورد از خواص مکانیکی می‌باشد، مقاومت یک ماده در مقابل تغییر شکل پلاستیک موضعی یا فرو رفتن ماده سخت دیگری در آن را "سختی" گویند [۹].

تست سختی نمونه‌ها با اعمال نیرو ۱ kg و به مدت ۱۵ ثانیه انجام شد. در جدول ۴-۱۲ عدد میکرو سختی ویکرز و نسبت چگالی بعد از سینتر شدن به چگالی تئوری هر یک از نمونه‌ها آورده شده است. نمونه‌های با درصد وزنی‌های مختلف مطابق با جدول ۴-۹ و ۴-۱۰ در فشار ۲۵۰ Mpa پرس و در دمای ۵۰۰ °C سینتر شده‌اند. در جدول ۴-۱۲ عدد سختی هر یک از این نمونه‌ها آورده شده است.

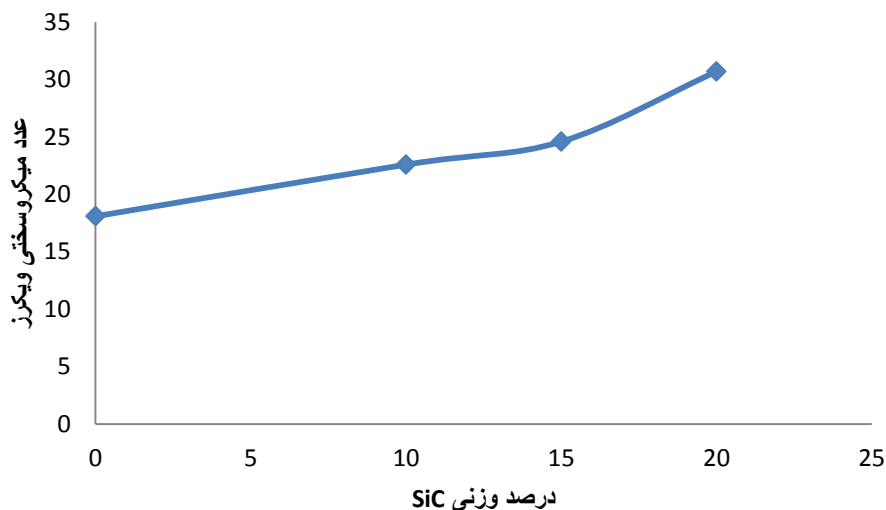


جدول ۴-۱۲- عدد میکروسختی کامپوزیت‌ها و نانو کامپوزیت‌های سنتز شده

کد نمونه	عدد میکروسختی ویکرز	کد نمونه	عدد میکروسختی ویکرز
آلومینیوم خالص	۱۸.۱	A3.5-S1.5	۲۰/۶
S10	۲۲.۶	A1.5-S3.5	۲۲
S15	۲۴.۶	A5n	۲۰/۶
S20	۳۰.۷	A7n	۲۱/۲
A5	۱۸.۹	A10n	۲۲/۱۳
A7	۱۹.۳	A15n	۲۴/۶
A10	۲۰.۶	AS7.5n	۲۳/۷
A15	۲۲	AS3.5n	۲۷/۴
AS7.5	۲۵.۴	AS2.5n	۲۳/۶
AS3.5	۲۲.۳	A3.5n-S1.5	۲۵/۶
AS2.5	۱۹.۳	A1.5n-S3.5	۲۳/۶

در شکل ۴-۱۴ میکروسختی ویکرز کامپوزیت Al/SiC با درصد وزنی‌های مختلف SiC رسم شده است. همان طور که در نمودار دیده می‌شود، با افزایش میزان فاز تقویت کننده (SiC) به زمینه آلومینیوم سختی افزایش یافته است. به دلیل سختی بالای SiC، اضافه کردن این فاز به زمینه آلومینیوم باعث

افزایش سختی شده است. با اضافه کردن ۲۰٪ SiC سختی آلومینوم از ۱۸/۱ به ۳۰/۷ رسیده است و این نشان دهنده این است که، با افزودن فاز سخت، سختی نمونه ۶۹٪ افزایش یافته است.

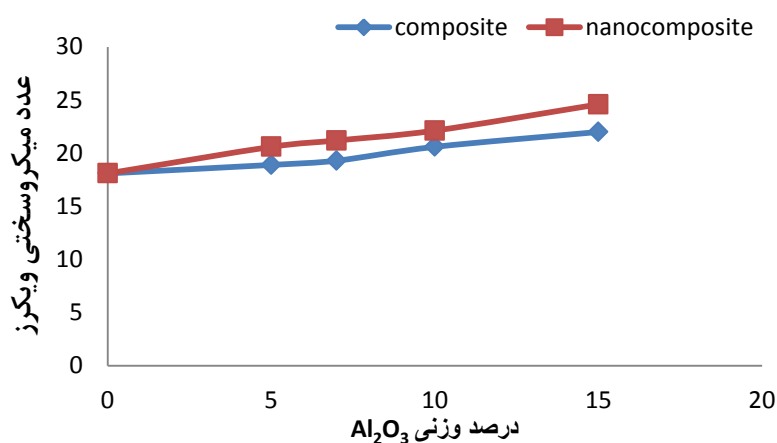


شکل ۴-۱۴- نمودار میکروسختی ویکرز کامپوزیت Al/SiC بر حسب درصد وزنی SiC

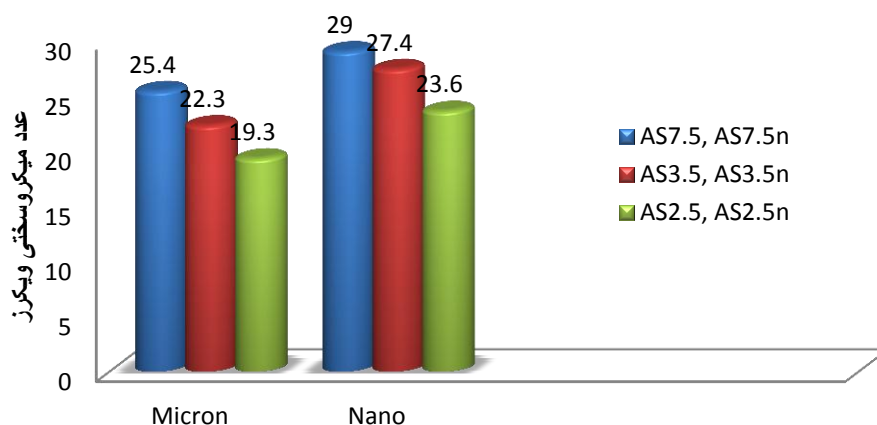
همچنین برای کامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> نیز با افزایش فاز سخت (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) سختی نسبت به آلومینیوم خالص افزایش یافته است. با اضافه کردن ۱۵٪ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> سختی به میزان ۲۱٪ افزایش یافته است. در مقایسه با همین میزان SiC سختی کامپوزیت Al/SiC، ۳۶٪ افزایش یافته است. دلیل درصد افزایش بیشتر سختی کامپوزیت Al/SiC نسبت به Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، زمانی که درصد وزنی فاز سخت یکسان است، بالاتر بودن سختی SiC نسبت به Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> می‌باشد.

علاوه بر این، در شکل ۴-۱۵ میکروسختی نانوکامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3n</sub> با درصد وزنی‌های مختلف Al<sub>2</sub>O<sub>3n</sub>، نیز رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در درصد وزنی‌های یکسان Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> میکرو سختی نانوکامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3n</sub> نسبت به کامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> افزایش یافته است. برای مثال با ۱۰٪ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، میکروسختی کامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، ۲۰/۶ و نانوکامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3n</sub>، ۲۲/۱۳ می‌باشد. در واقع

میکروسختی نانوکامپوزیت با این درصد وزنی نسبت به کامپوزیت ۷٪ افزایش یافته است. دلیل افزایش سختی نانوکامپوزیت نسبت به کامپوزیت مشابه این است، که در یک درصد وزنی مشخص وقتی ذرات فاز تقویت کننده در ابعاد نانو می باشد، تعداد موانع بر سر راه نابجایی ها افزایش یافته، در نتیجه سختی افزایش می یابد. برای حالتی که درصد وزنی فاز تقویت کننده ۱۵٪ می باشد، میکروسختی نانو کامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  نسبت به کامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  ۱۲٪ افزایش یافته است.



شکل ۴-۱۵- نمودار میکروسختی ویکرز کامپوزیت و نانوکامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  برحسب میزان  $Al_2O_3$



شکل ۴-۱۶- نمودار میکروسختی ویکرز کامپوزیت و نانوکامپوزیت سه تایی  $Al/SiC-Al_2O_3$  با درصد وزنی های مختلف فاز تقویت کننده

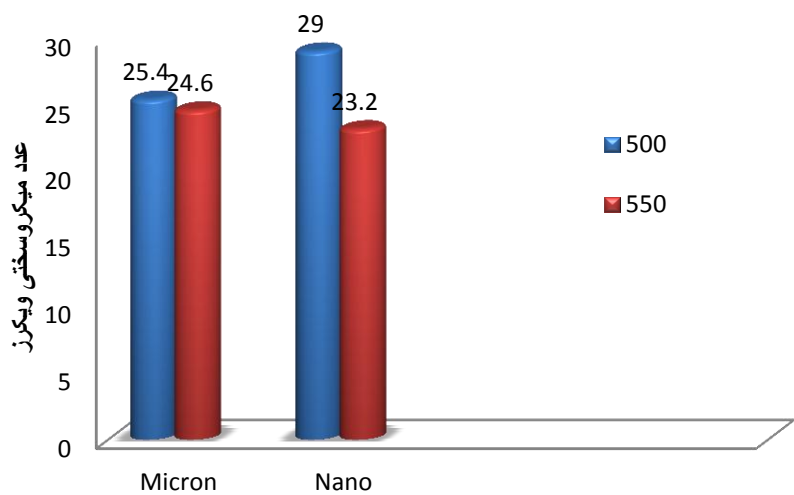
در شکل ۴-۱۶ نمودار میکروسختی کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های سه تایی  $Al/SiC-Al_2O_3$  با درصد وزنی‌های مختلف (جدول ۴-۹ و ۴-۱۰) نشان داده شده است. در این نمودار نیز به خوبی مشاهده می‌شود که، با افزایش درصد وزنی فاز تقویت کننده سرامیکی، عدد میکروسختی افزایش یافته است. همچنین عدد میکروسختی نانوکامپوزیت‌ها در مقایسه با نمونه‌های کامپوزیتی، به مراتب بیشتر است. همان طور که در بالا ذکر شد، این افزایش به دلیل زیاد شدن موانع بر سر راه نابجایی‌هاست.

یکی دیگر از نتایج بسیار جالب این تحقیق سختی نمونه با درصد وزنی  $3/5$  درصد وزنی  $Al_2O_3$  و  $3/5$  درصد وزنی  $SiC$  است که، سختی بالاتری نسبت به نمونه با  $15$  درصد وزنی فاز سخت  $SiC$  دارد. در این حالت با وجود اینکه درصد فاز سخت در نمونه نانوکامپوزیت سه تایی، نصف کامپوزیت دوتایی  $Al/SiC$  است ولی سختی نانو کامپوزیت سه تایی بالاتر است. بنابراین اضافه کردن ذرات بافاز سخت با اندازه نانومتری با وجود درصد فاز سخت کمتر باعث بهبود خواص مکانیکی شده است که، این امر باعث می‌شود، این نوع نانوکامپوزیت به علت درصد فاز سخت کمتر در سختی یکسان، چقرمگی شکست بالاتری داشته و امکان کاهش قیمت محصولات تولیدی را فراهم می‌کند.

در جدول ۴-۱۳ عدد میکرو سختی نمونه‌های  $Al_2O_3_{\mu}-7.5\%wt SiC_{\mu}-7.5\%wt Al$  و  $Al/7.5\%wt$  در دو دمای  $500^{\circ}C$  و  $550^{\circ}C$  سینتر شده اند، آمده است. مشخصات نمونه‌هایی که در دمای  $500^{\circ}C$  سینتر شده اند، مطابق جدول ۴-۹ و ۴-۱۰  $AS7.5$  و  $AS7.5n$  می‌باشد، و در دمای  $550^{\circ}C$  برای نمونه  $Al_2O_3_{\mu}-7.5\%wt SiC_{\mu}-7.5\%wt Al$  و  $Al/7.5\%wt SiC_{\mu}$  به ترتیب کد نمونه  $AS7.5/550$  و  $AS7.5n/550$  می‌باشد. بقیه شرایط سینتر کردن از قبیل شیب دمایی، اتمسفر و زمان سینتر شدن برای هر دو نمونه کاملاً یکسان است.

جدول ۴-۱۳- عدد میکروسختی کامپوزیت و نانوکامپوزیت  $Al/7.5\% wt SiC-7.5\% wt Al_2O_3$  در دماهای  $500^\circ C$  و  $550^\circ C$

کد نمونه	عدد میکروسختی ویکرز	کد نمونه	عدد میکروسختی ویکرز
AS7.5	۲۵/۴	AS7.5/550	۲۴/۶
AS7.5n	۲۹	AS7.5n/550	۲۳/۲

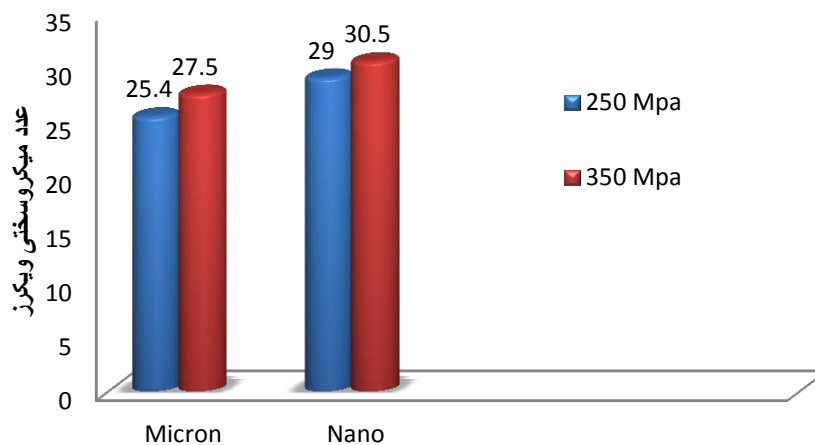


شکل ۴-۱۷- نمودار میکروسختی ویکرز کامپوزیت و نانوکامپوزیت  $Al/7.5\% wt SiC-7.5\% wt Al_2O_3$  در دماهای  $500^\circ C$  و  $550^\circ C$

نمونه‌های  $Al/7.5\% wt SiC_{\mu}-7.5\% wt Al_2O_{3n}$  و  $Al/7.5\% wt SiC_{\mu}-7.5\% wt Al_2O_{3\mu}$  در دو فشار  $250\ MPa$  و  $350\ MPa$  پرس و در دمای  $500^\circ C$  سینتر شدند. کد نمونه‌های کامپوزیت و نانوکامپوزیت در فشار  $350\ MPa$  به ترتیب AS7.5/350 و AS7.5n/350 می‌باشد. در جدول ۴-۱۴ عدد میکروسختی ویکرز این نمونه‌ها آمده است.

جدول ۴-۱۴- عدد میکروسختی کامپوزیت و نانوکامپوزیت  $Al_2O_3$ -7.5wt SiC-7.5wt Al در فشارهای MPa ۲۵۰ و ۳۵۰

کد نمونه	عدد میکروسختی ویکرز	کد نمونه	عدد میکروسختی ویکرز
AS7.5	۲۵/۴	AS7.5/350	۲۷/۵
AS7.5n	۲۹	AS7.5n/350	۳۰/۵



شکل ۴-۱۸- عدد میکروسختی کامپوزیت و نانوکامپوزیت  $Al_2O_3$ -7.5wt SiC-7.5wt Al در فشارهای MPa ۲۵۰ و ۳۵۰

#### ۴-۷- نتیجه گیری

- در فرآیند آسیاب کاری پارامترهای مختلفی از قبیل زمان آسیاب کاری، سرعت آسیاب کاری، نسبت وزنی گلوله به پودر، اندازه و توزیع عامل ساینده و ... بر روی اندازه نهایی پودر تأثیر گذارند. با افزایش زمان آسیاب کاری میانگین اندازه ذرات از ۵۰-۶۰ میکرومتر به ۵۳ نانومتر کاهش یافته است.

- با افزایش زمان آسیاب کاری و نسبت وزنی گلوله به پودر اندازه ذرات کاهش یافته است.
- ۲- هنگام آسیاب کاری پودر SiC در قندانی فولادی و با گلوله‌های فولادی میزان زیادی ناخالصی آهن در پودر بعد از آسیاب کاری مشاهده شد. که با استفاده از اسید شویی این ناخالصی حذف شد.
- ۳- با اضافه کردن تقویت کننده به زمینه آلومینیومی، سختی کامپوزیت و نانوکامپوزیت نسبت به آلومینیوم افزایش یافته است. برای مثال با اضافه کردن ۲۰٪ SiC به زمینه آلومینیوم، سختی کامپوزیت Al/SiC نسبت به آلومینیوم ۶۹٪ افزایش یافته است.
- ۴- سختی کامپوزیت‌های Al/SiC نسبت به کامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در درصد وزنی‌های یکسان بیشتر است.
- ۵- سختی نانو کامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> نسبت به کامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در درصد وزنی یکسان بالاتر است. برای مثال در درصد وزنی ۱۵٪ سختی نانوکامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> نسبت به کامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، ۱۱٪ افزایش یافته است.
- ۶- سختی کامپوزیت‌های سه تایی Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC نسبت به کامپوزیت دو تایی Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و Al/SiC در درصد وزنی یکسان فاز تقویت کننده به مراتب بیشتر است. سختی کامپوزیت سه تایی Al/7.5% wt Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>μ-7.5% wt SiC، ۲۵/۴ و سختی کامپوزیت دو تایی Al/15% wt SiC با ۲۴/۶ است.
- ۷- سختی نانوکامپوزیت سه تایی Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC نسبت به کامپوزیت دو تایی Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و Al/SiC بیشتر است. سختی نانوکامپوزیت Al/1.5% wt SiCμ-3.5% wt Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>n، با ۵ درصد فاز تقویت کننده ۲۵/۶ و سختی کامپوزیت دو تایی Al/15% wt SiC با ۱۵٪ فاز تقویت کننده، ۲۴/۶ است.
- ۸- سختی کامپوزیت و نانو کامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC (با درصد وزنی یکسان ۷.۵٪، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و SiC) با افزایش دمای سینتر شدن، کاهش یافته است.

۹- سختی کامپوزیت و نانو کامپوزیت Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC (با در صد وزنی یکسان ۷.۵٪، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و SiC) با افزایش فشار پرس کردن پودرهای کامپوزیتی افزایش می‌یابد.

#### ۴-۸- پیشنهاداتی بر ادامه کار

۱- انجام دادن آسیاب کاری کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی در دماهای پایین با استفاده از سیستم ازت مایع

۲- افزایش زمان آسیاب کاری و بررسی خواص مکانیکی

۳- بررسی دیگر خواص مکانیکی مانند استحکام و سایش

۴- بررسی دماهای مختلف سینتر شدن و تأثیر آن بر روی خواص مکانیکی

۵- سنتز نمونه‌ها با استفاده از روش پرس داغ و مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌های سنتز شده با روش پرس سرد



## فصل پنجم

# نتایج مطالعه نانو کامپوزیت های سنتز شده به روش

## تذریق پلیمر

## ۵-۱- روش تزریق پلیمر

یکی از مهمترین موانع در توسعه و تهیه کامپوزیت‌های سه تایی با خواص مناسب، به دست آوردن توزیع مناسب از ۳ فاز موجود در این نوع کامپوزیت‌هاست. وجود ذرات با خواص متفاوت معمولاً توزیع ذرات را با مشکل مواجه می‌کند. توزیع ذرات تابع مستقیم روش تولید این نوع کامپوزیت‌ها می‌باشد. تا کنون روش‌های مختلفی نظیر مخلوط سازی ذرات اولیه در حالت جامد، روش‌های شیمیایی نظیر سل ژل، روش‌های فاز بخار نظیر لایه نشانی از فاز بخار و آلیاژ سازی مکانیکی جهت تهیه این نوع کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته اند [۴۱]. هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند. روش‌های آلیاژ سازی مکانیکی و مخلوط کردن در حالت جامد روش‌هایی ساده و ارزان هستند اما امکان ورود آلودگی از اجزاء مورد استفاده وجود دارد. در روش‌های شیمیایی توزیع مناسبی از فازهای مختلف به دست می‌آید اما این روش‌ها عمدتاً بازده کمی دارند. در روش‌های فاز بخار توزیع بسیار مناسب از ذرات فاز ثانویه ایجاد می‌شود اما این روش‌ها عمدتاً گران قیمت هستند.

روش تزریق پلیمری در ابتدا در تهیه الکترودهای مورد استفاده در پیل‌های سوختی به کار گرفته شد. در این روش ابتدا یک اسکلت جامد متخلخل از مواد اولیه تهیه می‌شود و سپس محلول پلیمری از ذرات فاز ثانویه با فشار به درون تخلخل‌های اسکلت اولیه مکش می‌شود. این محلول پلیمری سپس در دمای بالا تجزیه شده و به ذرات مورد نظر نظیر اکسیدها یا کاربیدها تجزیه می‌شود. در واقع این روش تلفیقی از دو روش مخلوط سازی حالت جامد و روش شیمیایی است که می‌تواند مزایای هر دو روش را داشته باشد [۴۲ و ۴۳].

## ۲-۵- سنتز نمونه‌ها

سنتز نمونه‌ها به روش تزریق پلیمر بر اساس مراحل زیر صورت گرفت:

### الف- آسیاب کاری

ابتدا درصد مشخصی از مواد اولیه شامل آلومینیوم و سیلیکون کاربید را مطابق جدول ۱-۵ و ۲-۵ توزین می‌شود. سپس طبق شرایط موجود در جدول ۳-۵ مواد اولیه آسیاب کاری شدند. از آنجایی که جنس قندانی تفلونی بود و امکان وجود آلودگی در پودرهای کامپوزیتی بعد از آسیاب کاری وجود داشت، طبق شرایط گفته شده در بخش ۴-۵-۲ آلودگی احتمالی موجود در مواد آسیاب کاری شده، حذف شد.

جدول ۵-۱- درصد وزنی نمونه‌های سنتز شده به روش آسیاب کاری

کد نمونه	درصد وزنی نمونه‌ها
A10-S5	Al/10% wt SiC-5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
A7.5-S7.5	Al/7.5% wt SiC-7.5% wt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

جدول ۵-۲- درصد وزنی نمونه‌های سنتز شده به روش تزریق پلیمر

کد نمونه	درصد وزنی نمونه‌ها
IS10	Al- 10% wt SiC
IS7.5	Al- 7.5% wt SiC
IS5	Al- 5% wt SiC

جدول ۵-۳- شرایط آسیاب کاری نمونه‌های سنتز شده به روش تزریق پلیمر

اتمسفر	جنس گلوله	جنس قندانی	وزن پودر (g)	سایز گلوله (mm)	BPR	سرعت (rpm)	زمان آسیاب کاری (ساعت)
هوا	فولادی	تفلونی	۵	۲	۲:۱	۲۰۰	۱

### ب- فشرده سازی پودرهای کامپوزیتی

به پودرهای کامپوزیتی مقدار مشخصی PVA (طریقه آماده سازی آن در بخش ۴-۵-۳ آمده است) و آب مقطر اضافه شد و سپس مقدار مشخصی از پودر در فشار ۱۲۰ Mpa پرس شد. بدین ترتیب یک قرص متخلخل از مواد اولیه تهیه می‌شود. قرص‌های بدست آمده دارای قطر ۲۵ mm و ضخامت ۲ mm-۳ می‌باشند.

### پ- مرحله تزریق پلیمر

قرص‌های متخلخل تهیه شده را در محلول نیترات آلومینیوم (۹/۴ گرم) و اتانول (۱۰۰ سی سی) به مدت ۸ دقیقه غوطه ور کردیم و سپس برای مدت ۴ دقیقه تحت خلا قرار دادیم، تا محلول پلیمری به نحو موثرتری در تخلل‌ها وارد شود.

### ت- تجزیه محلول پلیمری

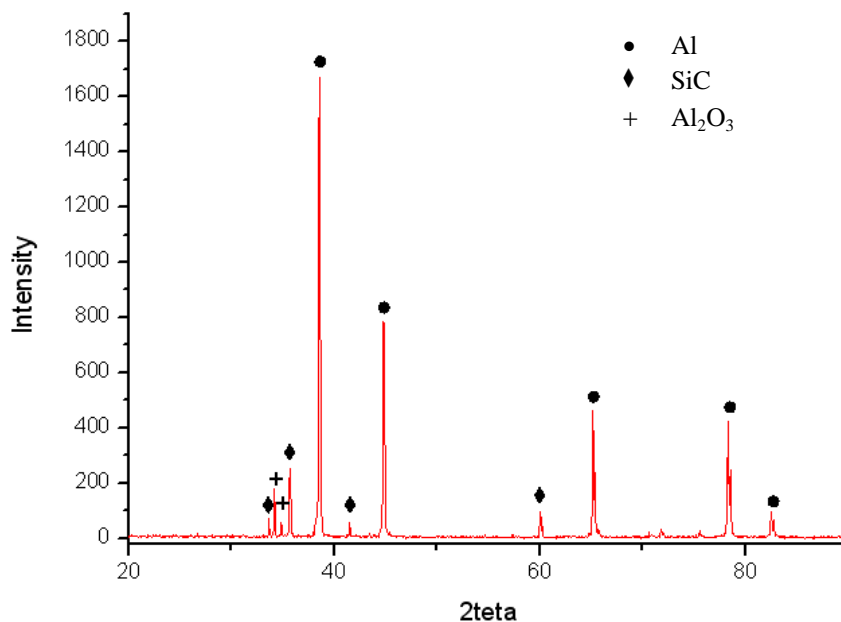
به منظور تجزیه محلول پلیمری و تبدیل آن به ذرات اکسیدی، نمونه‌ها در کوره ای که دمای آن با آهنگ دمایی ۱۱۱ °C/h تا ۳۵۰ °C و به مدت ۱ ساعت حرارت داده شدند.

### ث - سینتر نمونه‌ها

بعد از تجزیه محلول پلیمری، قرص‌ها را به مدت ۲ ساعت، تحت اتمسفر آرگون در کوره تیوپی الکتریکی که دمای آن با آهنگ  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  تا دمای  $500^{\circ}\text{C}$  افزایش یافته قرار داده می‌شوند.

### ۵-۳- تحلیل نمونه‌های سنتز شده

همان طور که در طیف پراش XRD در شکل ۵-۱ ملاحظه می‌شود، حضور پیک‌های مربوط به فاز آلومینا نشانگر تشکیل این فاز و در نتیجه معرف این موضوع است که، محلول پلیمری به خوبی وارد تخلخل‌های قرص  $\text{Al}/\text{SiC}$  شده است. همچنین این محلول پلیمری تجزیه شده و ذرات اکسیدی آلومینا شکل گرفته است.



شکل ۵-۱- تصویر پراش XRD مربوط کامپوزیت  $\text{Al}/\text{SiC}-\text{Al}_2\text{O}_3$  سنتز شده به روش تزریق پلیمر

برای مقایسه روش تزریق پلیمری و روش آسیاب کاری، میکروسختی کامپوزیت‌های حاصل را با یکدیگر مقایسه کردیم. جدول ۴-۵ میکروسختی هر یک از این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. میزان نیروی وارده برای تست میکروسختی ۵۰ gf و مدت زمان ۳۰ ثانیه بود.

جدول ۴-۵ - عدد میکروسختی کامپوزیت سه تایی Al/SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> سنتز شده به روش آسیاب کاری و تزریق پلیمری

کد نمونه ها	روش سنتز نمونه	درصد وزنی نمونه‌ها	عدد میکرو سختی ویکرز
A10-S5	آسیاب کاری	Al/10% wt SiC-5% wtAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۷۰/۱
A7.5-S7.5	آسیاب کاری	Al/7.5% wt SiC-7.5% wtAl <sub>2</sub> O	۱۱۰
IS10	تزریق پلیمر	Al/ 10% wt SiC	۹۶/۱۶
IS7.5	تزریق پلیمر	Al/ 7.5% wt SiC	۶۶/۱۶
IS5	تزریق پلیمر	Al/ 5% wt SiC	۶۶/۷

همان طور که عددهای سختی جدول ۴-۵ نشان می‌دهد، در نمونه‌های سنتز شده به روش تزریق پلیمر با کاهش میزان SiC سختی نمونه‌ها نیز کاهش می‌یابد، زیرا با کاهش ذرات SiC، درصد فاز سرامیکی کاهش می‌یابد، در نتیجه میزان تخلخل در قرص‌های Al/SiC نیز کاهش یافته، در نتیجه محلول پلیمری کمتری وارد تخلخل‌ها می‌شود. با کاهش میزان SiC و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، سختی کاهش می‌یابد. همچنین برای ۱۰٪ وزنی SiC، سختی کامپوزیت به روش تزریق پلیمر به مراتب بالاتر از کامپوزیت سنتز شده به روش آسیاب کاری است.

## ۵-۴- نتیجه گیری

نتایج سختی سنجی جدول ۵-۳ نشانگر آن است که، بیشترین سختی مربوط به نمونه آسیاب کاری شده حاوی مقادیر یکسان SiC و  $Al_2O_3$  (هر یک به مقدار ۷/۵٪) می‌باشد، ولی سختی نمونه‌های سنتز شده به روش تزریق پلیمر نیز مقادیر مناسبی را از خود نشان می‌دهند. در روش تزریق پلیمر زمانی که درصد فاز تقویت کننده زیاد می‌باشد، توزیع فاز تقویت کننده نسبت به روش آسیاب کاری بهتر است، در نتیجه سختی کامپوزیت سه تایی  $Al/10\%wt\ SiC-5\%wt\ Al_2O_3$  سنتز شده به روش تزریق پلیمر بالاتر از سختی نمونه سنتز شده به روش آسیاب کاری است.

بنابراین از آنجایی که آلودگی در این روش نسبت به روش آسیاب کاری کمتر است و همچنین با توجه به اینکه در این روش، به توزیع یکنواخت تری از فاز تقویت کننده در زمینه می‌توان دست یافت، این روش می‌تواند، به عنوان یک روش جدید و مناسب برای سنتز کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها به کار گرفته شود.

## ۵-۵- پیشنهاداتی بر ادامه کار

- ۱- سنتز نانوکامپوزیت سه تایی  $Al/Al_2O_3-SiC$  با استفاده از روش تزریق پلیمر، در حالی که ذرات SiC در ابعاد نانو باشد و مقایسه با نانوکامپوزیت سه تایی  $Al/Al_2O_3-SiC$  که با روش آسیاب کاری سنتز شده اند.
- ۲- انجام مرحله مکش محلول پلیمری در چند مرحله برای تشکیل بیشتر ذرات اکسید آلومینیوم

پوست



## پیوست

کیفیت موادی که در طراحی قطعات صنعتی به کار می‌رود، بیش از همه به خواص مکانیکی آنها بستگی خواهد داشت. اطلاع یافتن از ساختار مواد برای طراحی یک قطعه امری لازم و قطعی است تا از هرگونه تغییر شکل بیش از حد ماده و شکست در قطعه جلوگیری به عمل آید.

عکس العمل مواد جامد در مقابل نیروها، گشتاورها و یا به طور کلی هر نوع تنش‌های خارجی وارد بر آن، اعم از استاتیکی و یا دینامیکی، در شرایط خاص محیط کار یا محیط آزمایش، "رفتار یا خواص مکانیکی" نامیده می‌شود. بر روی خواص مکانیکی عوامل خارجی از قبیل تنش، سرعت و مدت زمان وارد آمدن تنش، درجه حرارت، نوع تنش (از لحاظ استاتیکی یا دینامیکی) و در حالت تنش متناوب تعداد دفعات وارد آمدن آن و همچنین اثر شیمیایی محیط اطراف ماده مورد آزمایش تأثیر می‌گذارد. خواص مکانیکی مواد با انجام آزمایش‌های دقیق که تا حد ممکن نزدیک به شرایط عملی و واقعی صورت می‌گیرد، بدست می‌آید. برای تعیین خواص مکانیکی و رفتار مواد در برابر نیروهای مختلف نیاز به انجام آزمایش‌های مکانیکی مختلفی می‌باشد. اغلب این آزمایش‌ها به صورت استاندارد در آمده اند.

## تنش- کرنش

تنش و کرنش دو مفهوم مکانیکی هستند که در قطعاتی که تحت تأثیر نیروهای داخلی و یا خارجی قرار دارند بوجود می‌آیند. آنها می‌توانند ماهیت الاستیکی و یا پلاستیکی داشته باشند.

اگر میله ای با سطح مقطع  $A$  تحت نیروی کشش  $F$  قرار گیرد و برشی از این جسم در نظر گرفته شود، در آن نیروی مقاومت داخلی برابر با  $\int \sigma dA$  بوجود می‌آید، که با نیروی خارجی  $F$  مقابله می‌کند، شکل تصویر جسم آزاد میله را نشان می‌دهد. بنابراین

$$F = \int \sigma \, dA$$

که در آن  $\sigma$  تنش محوری یا عمود بر صفحه می‌باشد و  $A$  نیز سطح مقطع میله است. اگر توزیع تنش روی سطح مقطع یکنواخت باشد، خواهیم داشت:

$$F = \sigma \int dA = \sigma A$$

در حالت کلی مقدار نیروی وارد شده بر واحد سطح را "تنش" گویند.

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

تنش‌ها می‌توانند باعث به وجود آمدن تغییر شکل‌هایی از نوع الاستیکی و یا همچنین پلاستیکی شوند.

تغییر طول جسم نسبت به طول اولیه در اثر اعمال تنش را "کرنش" گویند.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

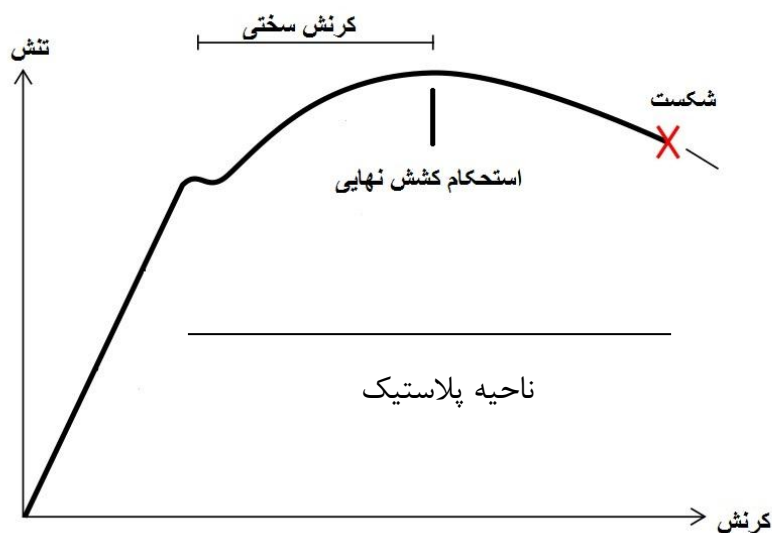
### منحنی تنش-کرنش

شکل ۱ منحنی شماتیکی از منحنی تنش-کرنش است. در ابتدا منحنی (ناحیه ۱) به صورت خطی بالا می‌رود و اگر نیرو برداشته شود، نمونه دوباره به حالت اولیه خود بر می‌گردد. به این قسمت نمودار منطقه الاستیکی یا کشسان خطی می‌گویند. در این حالت تغییر شکل ( $\Delta l$ ) با نیروی ( $F$ ) وارد بر جسم رابطه خطی دارد و رابطه بین تنش و کرنش بوسیله قانون یا رابطه هوک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

نسبت  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$  را که در این ناحیه برای هر ماده، در یک درجه حرارت ثابت، عدد ثابتی است،

"مدول الاستیسیته" یا "مدول یانگ" می‌نامند.



شکل ۱- منحنی تنش-کرنش

مدول الاستیسیته معیاری برای سفتی ماده است که همان مقاومت در برابر تغییر فرم می‌باشد. مدول الاستیسیته ناشی از نیروهای پیوستگی بین اتم‌های ماده است و این نیروها نیز بدون تغییر طبیعت ماده تغییر زیادی نمی‌کنند.

در ناحیه تغییر شکل پلاستیک بعد از برداشتن تنش جسم به حالت اولیه خود بر نمی‌گردد و تغییر شکل در جسم باقی می‌ماند.

تنش لازم برای تغییر شکل پلاستیک را تنش تسلیم گویند. در واقع تنش تسلیم ناحیه الاستیک را از ناحیه پلاستیک جدا می‌کند. با انجام تغییر فرم پلاستیک ماده دچار "کرنش سختی" یا "کار سختی"<sup>۱</sup> می‌شود. به عبارتی افزایش تنش تسلیم ماده به خاطر انجام تغییر شکل پلاستیک را کارسختی گویند. در نتیجه کارسختی، استحکام ماده افزایش می‌یابد.

<sup>1</sup>- Work or Strain Hardening

تنش مربوط به ماکزیمم نیروی اعمالی را "استحکام کششی نهایی"<sup>۱</sup> گویند. از آن به بعد دیگر تغییر فرم پلاستیک یکنواخت نیست و در نواحی از نمونه تغییر فرم بیشتر و کاهش سطح مقطع از تأثیر این کاهش سطح مقطع از تأثیر کارسختی بیشتر می‌گردد و در نتیجه استحکام کاهش می‌یابد. این سیر نزولی ادامه می‌یابد تا اینکه نمونه در نقطه می‌شکند. به استحکام در نقطه، "استحکام شکست" می‌گویند.

## انعطاف پذیری<sup>۲</sup>

میزان تغییر شکل پلاستیکی جسم تا قبل از شکست را "انعطاف پذیری" گویند. داشتن قابلیت انعطاف پذیری برای مواد یک پارامتر مهم است، زیرا باعث توزیع تنش‌های موضعی در ماده می‌شود. از طرفی تغییر شکل پلاستیک باعث کور شدن ترک و باعث جلوگیری از پیشروی ترک می‌شود. رفتار کلی مواد در برابر نیرو به دو گروه نرم<sup>۳</sup> و ترد<sup>۴</sup> تقسیم می‌شود، که این بستگی به قابلیت تغییر فرم پلاستیک ماده دارد. مواد نرم موادی هستند کرنش زیادی می‌گیرند تا بشکنند، در حالی که مواد ترد کرنش تا شکست آنها صفر یا بسیار کم است.

## چقرمگی<sup>۵</sup>

توانایی جذب انرژی ماده تا شکست را "چقرمگی" گویند. چقرمگی پارامتری است که هم به استحکام و هم به انعطاف پذیری ماده بستگی دارد.

---

1- Ultimate Tensile Strength

2- Ductility

3- Ductile

4- Brittle

5- Toughness

شکل هندسی نمونه و چگونگی اعمال بار در تعیین چقرمگی بسیار مهم است. در بارگذاری فعال (سرعت کرنش بالا) وقتی یک شکاف (یا نقطه تمرکز تنش) وجود داشته باشد، چقرمگی شکاف با استفاده از آزمایش ضربه محاسبه می‌شود.

در حالت آرام و استاتیک (سرعت کرنش پایین) چقرمگی از طریق نتایج آزمایش تنش-کرنش بدست می‌آید که، برابر سطح زیر نمودار تنش-کرنش تا مرحله شکست است. واحد چقرمگی انرژی بر واحد حجم ماده است.

## مراجع

- 1- P.K. Rohatgi, R.Q. Guo, P. Huang, S. Ray, (1997) Metall. Mater. Trans. A 28 245–250.
- 2- Chellman DJ, Langenbeck SL. (1993) Aerospace applications of advanced aluminum alloys. J Key Eng Mater;77–78:49–60.
- 3- Sanjay K. Mazumdar,(2002) “Composites manufacturing: materials, product, and process engineering”, CRC press
- 4- B. Prabhu, C. Suryanarayana, L. An, R. Vaidyanathan, (2006) Mater. Sci. Eng. A 425192–200.
- 5- H.Wang, R. Zhang, X. Hu, C.A.Wang, Yong. Huang, (2008), Journal of Materials Processing Technology 197, 43–4
- 6- Hutchings IM, Wilson S, Alpas AT. In: Clyne TW, editor. (2000), Comprehensive composite materials. Elsevier: Amsterdam;. p. 501.
- 7- Lima Filho A, Atkinson HV, Los Rios E, King S, Jones H. (1998) Hot isostatic pressing of metal reinforced metal matrix composites. JMater Sci;33:5517.
- 8- F. Tang, B.Q. Han, M. Hagiwara, J.M. Schoenung, (2007), Adv. Eng. Mater, 9, 286–291.
- 9- W. D. Callister, Materials Science and Engineering An Introduction, John Wiley & Sons, New York
- ۱۰- حسین تویسرکانی، "اصول علم مواد"، دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ پنجم، ۱۳۸۵
- 11- [www.virginia.edu/bohr/mse209/chapter17.htm](http://www.virginia.edu/bohr/mse209/chapter17.htm)
- 12- K.Kaw (2006), « *mechanics of composite materials* », CRC press
- 13- Naresh Prasad (2006), **PhD. Thesis**, « *Development and characterization of metal matrix composite using red mud an industrial waste for wear resistant applications* » Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela
- 14- Bozic D., Dimcic O., Dimcic B., Vilotijevic M., Riznic-Dimitrijevic S. (2009), Journal of Alloys andCompounds, vol. 487 1-2,pp. 511-516.

- 15- P. M. Ajayan, L. S. Schadler, P. V. Braun (2003), «*Nanocomposite Science and Technology*», WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- 16- D. Poirier et al. (2010) *Materials Science and Engineering A* 527 7605–7614
- 17- Nikhil Guptha and K.G. Satyanarayana,(2006), *JOM*, Vol. 58, No. 11, pp. 91-93
- 18- H. Ahlatci et al. , (2006), *Tribology International*, 39, 213–220
- 19- Cecilia Borgonovo, (2010), Degree of Master of Science thesis, «*Aluminum Nano-Composites for Elevated Temperature Applications*», Worcester Polytechnic Institute
- 20- Karl U. Kainer, (2006), «*Metal Matrix Composites. Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*», WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- 21- www.almmc.com: “Discontinuously Reinforced Al has come to an edge”.
- 22- Camargo et al.(2009), *Materials Research*, Vol. 12, No. 1, 1-39
- 23- X.C. Tong, H.S. Fang, (1998), *Metall. Mater. Trans. A*, 29, 893.
- 24- Z.Ren and S.Chen, Mechanical properties of nanometric particulates reinforced aluminum composites, <http://www.materials.unsw.edu.au/NanoWeb>
- 25- Hosking FM, Folgar Portillo F, Wonderlin R, Mehrabian R. (1982) Composites of aluminium alloys: fabrication and wear behaviour. *J Mater Sci*;17:477–98.
- 26- Gurcan AB, Baker TN. (1995) Wear behaviour of AA 6061 aluminium alloy and its composites. *Wear*;188:185–91.
- 27- Park HC. (1992) Wear behaviour of hybrid metal matrix composite materials. *Scripta Metall Mater*;27:465–70.
- 28- Ismail Ozdemir , Sascha Ahrens, Silke Mucklich, Bernhard Wielage, (2008) *Journal of materials processing technology* 205, 111–118
- 29- L. Kollo et al, (2010) ,*Journal of Alloys and Compounds* 489, 394–400
- 30- K.B. Lee, H.S. Sim, S.W. Heo, H.R. Yoo, S.Y. Cho, H. Kwon, *Compos., Part A* 33 (2002) 709.
- 31- C.C. Koch, (1993), *Nanostruct. Mater.* 2, 109
- 32- G. Chen, G.X. Sun, Z.G. Zhu, (1999), *Mater. Sci. Eng., A* 265,197.

- 33- Suryanarayana, C. (1998). In: Powder Metal Technologies and Applications. ASM Handbook, Vol. 7. Materials Park, OH: ASM International, pp. 80–90
- 34- Suryanarayana, (2004) C. *Mechanical Alloying and Milling*; Marcel Dekker, New York, NY, U.S.A.; 35-57
- 35- E. Kuhn, (1984) “*Powder Metallurgy*,” ASM Handbook, Vol. 7, ASM International: Materials Park, OH. pp. 56–70.
- 36- Koch, C. C., Pathak, D., Yamada, K. (1993). In: deBarbadillo, J. J., et al., eds. *Mechanical Alloying for Structural Applications*. Materials Park, OH: ASM International, pp. 205–212.
- 37- Miki, M., Yamasaki, T., Ogino, Y. (1992). *Mater. Trans. Jpn. Inst. Metals* 33:839–844.
- 38- Calka, A., Williams, J. S. (1992). *Mater. Sci. For.* 88–90:787–794.
- 39- Kaloshkin, S. D., Tomlin, I. A., Andrianov, G. A., Baldokhin, U. V., Shelekhov, E. V.(1997). *Mater. Sci. For.* 235–238:565–570.
- 40- Yusuke Daiko, Atsunori Matsuda, (2010) ,journal of the Japan petroleum Institue, 53,24-32.
- 41- N,Chawla and R.Chawla,(2006) ,Springer Science+Business Media, Inc , pp 399
- 42- V. Petrovsky, T. Suzuki, P. Jasinski, T. Petrovsky and H. U. Anderson, (2004), *Electrochem. Solid-State Lett*, 7, A138.
- 43- T. Suzuki,a, P. Jasinski, H. U. Anderson and F. Doganb, (2004), *J. Electrochem. Soc.*, 151, A1678.



# مقالات مستخرج از پایان نامه

## مقاله ارائه شده

عنوان: "طراحی و ساخت آسیاب سیاره ای جهت سنتز نانوذرات فلز-سرامیکی"

نویسندگان: جواد محمدیان، فاطمه باقری، حامد قارونی، حمید هراتی زاده، محمود شریعتی

ارائه شده در: کنفرانس انجمن فیزیک ایران سال ۹۰

## مقاله ارائه شده

عنوان:

“Investigation of Mechanical Properties of the Hybrid Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+SiC Nanocomposite Prepared by Two Methods High Energy Ball Milling and Polymer Impregnation”

نویسندگان: فاطمه باقری، مجتبی قطعی، حمید هراتی زاده

ارائه شده در: چهارمین کنفرانس بین المللی نانوساختارهای کیش

مقاله پذیرفته شده

عنوان:

“The Mechanical Properties of Al/SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposites Fabricated by the High Energy Ball Milling”

نویسندگان: فاطمه باقری، حمید هراتی زاده، مجتبی قطعی

پذیرفته شده در: کنفرانس NANOSMAT ۲۰۱۱ لهستان

## Abstract

In recent years, aluminum metal matrix composites (MMCs) used for tribological components have attracted

more and more interests. They are widely used as in the automotive and aerospace industries, like high speed rotating or reciprocating mass items such as pistons, connecting rods, drive shafts, brake rotors, cylinder bores and ... . Compared with the corresponding monolithic alloys, aluminum matrix composites are attractive because of their improved strength, stiffness, creep behavior, wear resistance and low thermal expansion. Recently, more and more evidence shows that the mechanical properties of metal matrix composites can be enhanced significantly by adding nano-sized ceramic particle.

In this study, synthesis and characterization of the composite and nanocomposites of Al/SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/SiC and Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> were investigated. The high energy ball milling and impregnation method was used to prepare composite and nanocomposite. The microstructure and phases of the prepared composites and nanocomposites were investigated by using XRD and SEM. The mechanical properties (hardness) were investigated by Vickers. The results showed that nanocomposites improve mechanical properties.

In this study by the high energy ball milling decreasing particle size of Al/SiC powders to 35 nm. The result of Vickers microhardness showed that Vickers microhardness of nanocomposite higher than composite and Vickers microharness hybrid nanocomposite Al/SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> higher than composite Al/SiC and Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with same weight percents.

**Keywords:** Al matrix nanocomposite, high energy ball milling, impregnation



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of physics**

**Master of Science Thesis**

**Fabrication and Investigation of Mechanical  
Properties of Metal Based NanoComposite  
Materials**

**Fatemeh Bagheri**

Supervisors:

**Dr. H. Haratizadeh**

Advisor:

**Dr. M. Ghatte**

**February 2012**