

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد - گرایش شناسایی و انتخاب مواد

# بررسی تأثیر تخلخل کامپوزیت‌های Al/SiC تهیه شده به روش متالورژی پودر بر رفتار فشاری این کامپوزیت‌ها

نگارش

طاهره کجباف

استاد راهنما

دکتر امیر حسنی

سال ۱۳۸۹

این جانب طاهره کجیاف بدین وسیله اظهار می‌دارم که محتوای علمی این نوشتار با عنوان  
**بررسی تأثیر تخلخل کامپوزیت‌های Al/SiC تهیه شده به روش متالورژی پودر بر  
رفتار فشاری این کامپوزیت‌ها**

که به عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد گرایش شناسایی و انتخاب مواد به  
دانشکده مهندسی مواد و صنایع - دانشگاه سمنان ارائه شده، دارای اصالت پژوهشی بوده و  
حاصل کار این جانب است.

این جانب می‌دانم که اگر خلاف ادعای بالا در هر زمانی محرز شود، کلیه حقوق مترتب بر  
این نوشتار از این جانب سلب شده و مراتب قانونی مرتبط با آن نیز از طرف مراجع ذیربط قابل  
پیگیری است.

طاهره کجیاف ۸۶۱۱۱۸۹۰۰۸

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

و

همسر عزیزم

برای مهر و محبت و حمایت‌های بی دریغشان

## تشکر و قدردانی

سپاس و حمد بی‌پایان به درگاه ذات احدیت که همه توفیقات از اوست و جز او یار و یابری نیست.

اکنون که پایان‌نامه حاضر را به اتمام رسانده‌ام، لازم می‌دانم از **استاد راهنمای گرامی‌ام جناب آقای دکتر حسنی** به خاطر راهنمایی و توصیه‌های ایشان در این مدت و صبر و تحمل ایشان در به ثمر رسیدن این تحقیق صمیمانه قدردانی کنم.

از آقای دکتر سیم‌چی و آقای مهندس جلالی در آزمایشگاه تکنولوژی پودر دانشگاه صنعتی شریف برای همکاری و راهنمایی‌های مشفقانه‌شان کمال تشکر و قدردانی را دارم. از اساتید محترم آقایان دکتر هنربخش و دکتر میرزایی برای بازخوانی و تقبل مسئولیت ارزیابی پایان‌نامه سپاسگزارم.

و نیز از پرسنل آزمایشگاه‌های خواص مکانیکی و میکروسکوپ الکترونی و کارگاه پروژه دانشکده مهندسی آقایان مهندس خرمی‌راد و شاهی که در مراحل پروژه همکاری‌های لازم را نموده‌اند، مراتب تشکر را ابراز می‌دارم.

در پایان از همه عزیزان و دوستانی که در این مدت همراه من بودند؛ به پاس یاری و همکاری صمیمانه‌شان تشکر می‌کنم.

## فهرست مطالب

شماره صفحه	عنوان
۱.....	۱ مقدمه
۶.....	۲ مروری بر منابع
۶.....	۱-۲ معرفی کامپوزیت‌ها
۷.....	۲-۲ کامپوزیت‌های زمینه فلزی
۷.....	۱-۲-۲ معرفی کامپوزیت‌های زمینه فلزی
۸.....	۲-۲-۲ مکانیزمهای استحکام بخشی کامپوزیت‌ها
۱۰.....	۳-۲ کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم
۱۱.....	۱-۳-۲ کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم با تقویت کننده ذره‌ای
۱۱.....	۲-۳-۲ اثر عوامل مختلف بر خواص کامپوزیت‌های Al/SiC
۱۸.....	۴-۲ روشهای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی
۱۸.....	۱-۴-۲ فرآیندهای فاز جامد
۲۰.....	۲-۴-۲ فرآیندهای فاز مایع
۲۱.....	۱-۲-۴-۲ ریخته‌گری گردابی
۲۲.....	۳-۴-۲ فرآیندهای دو فازی
۲۴.....	۵-۲ کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم تولید شده به روش متالورژی پودر
۲۴.....	۱-۵-۲ مخلوط کردن
۲۴.....	۲-۵-۲ فشرده سازی
۲۵.....	۳-۵-۲ گاززدایی
۲۶.....	۴-۵-۲ تفجوشی
۲۶.....	۵-۵-۲ عملیات ترمومکانیکی
۲۸.....	۶-۲ آشنایی با آسیاکاری مکانیکی
۲۹.....	۱-۶-۲ انواع آسیاکاری مکانیکی
۳۲.....	۲-۶-۲ بررسی مکانیزم‌های فعال در آلیاژسازی مکانیکی
۳۵.....	۳-۶-۲ پارامترهای آسیاکاری
۳۸.....	۷-۲ فورج پودر
۳۹.....	۱-۷-۲ روشهای فورج پودر
۴۰.....	۲-۷-۲ شکل دادن سرد پیش‌ساخته‌های متالورژی پودر
۴۱.....	۳-۷-۲ ابزار فورج پودر

۴۱	..... مزایای فورج پودر	۲-۷-۴
۴۲	..... کارپذیری	۲-۸-۸
۴۳	..... عوامل مؤثر بر کارپذیری	۲-۸-۱
۴۸	..... آزمایشهای تعیین کار پذیری	۲-۸-۲
۵۰	..... تغییر شکل پلاستیک مواد متخلخل	۲-۹
۵۷	.....	
<b>۳ روش تحقیق</b>		
۵۷	..... مشخصات پودرهای مصرفی	۳-۱
۵۸	..... آسیاکاری مکانیکی	۳-۲
۵۹	..... فشردن پودرها	۳-۳
۶۰	..... تفجوشی نمونه‌ها	۳-۴
۶۰	..... آزمونهای میکروسکوپ الکترونی و پراش پرتو ایکس	۳-۵
۶۱	..... آزمونهای مکانیکی	۳-۶
۶۱	..... آزمون فشار مرحله‌ای	۳-۶-۱
۶۳	..... آزمون فشار پیوسته	۳-۶-۲
۶۵	.....	
<b>۴ نتایج و بحث</b>		
۶۵	..... بررسی مورفولوژی و اندازه دانه	۴-۱
۷۳	..... آزمون فشارش	۴-۲
۷۴	..... بررسی زمان آسیاکاری	۴-۲-۱
۷۹	..... بررسی مقدار تقویت کننده	۴-۲-۲
۸۴	..... بررسی اندازه ذرات تقویت کننده	۴-۲-۳
۸۸	..... بررسی چگالی نسبی اولیه	۴-۲-۴
۹۳	.....	
<b>جمع بندی</b>		
۹۵	..... مراجع	

## فهرست اشکال

- ۲ مروری بر منابع..... ۶
- شکل ۱-۲ کاهش اندازه ذره (و دانه) با زمان..... ۲۹
- شکل ۱-۲ مراحل مختلف آلیاژسازی مکانیکی در یک سیستم نرم - نرم..... ۳۱
- شکل ۳-۱ مراحل مختلف آلیاژسازی مکانیکی در سیستم‌های نرم- ترد..... ۳۲
- شکل ۴-۲ تغییرات اندازه ذرات با زمان در آسیاکاری نیکل-تانتالیم در سه مرحله مکانیزم..... ۳۴
- شکل ۵-۲ تغییرات اندازه‌ی ذرات با زمان در آسیاکاری آلومینیم-هافنیم در سه مرحله‌ی مکانیزم..... ۳۴
- شکل ۶-۲ فشارش گرم مجدد..... ۳۹
- شکل ۷-۲ مراحل فورج پودر (سرکوبی در قالب بسته)..... ۳۹
- شکل ۸-۱ مراحل تشکیل و رشد ترک در شکست نرم..... ۴۴
- شکل ۹-۱ شماتیک جوانه زنی و رشد ترک در کامپوزیت‌ها، (a) جوانه زنی حفره در زمینه و (b) جوانه زنی حفره با ایجاد ترک در ذرات و به هم پیوستن حفره‌ها..... ۴۶
- شکل ۱۰-۱ غیر همگنی تغییر شکل در آزمون فشار داغ..... ۴۷
- شکل ۱۱-۲ مقایسه میزان کارپذیری آلیاژهای کار شده و ریخته‌گری شده در دماهای مختلف..... ۴۸
- ۳ روش تحقیق..... ۵۷
- شکل ۱-۳ سیکل تف‌جوشی کامپوزیت‌های فشرده شده..... ۶۰
- شکل ۲-۳ نمودار روند کار روی نتایج آزمون فشارش مرحله‌ای..... ۶۳
- ۴ نتایج و بحث..... ۶۵
- شکل ۱-۴ مورفولوژی پودر آلومینیم مصرفی..... ۶۵
- شکل ۱-۲ تصویر SEM پودر SiC با اندازه متوسط الف)  $16\mu\text{m}$  ، ب)  $12\mu\text{m}$ ..... ۶۵
- شکل ۳-۴ مورفولوژی پودر  $12\mu\text{m}$ -10%SiC-AL پس از الف) ۴ ساعت، ب) ۸ ساعت و ج) ۱۲ ساعت آسیاکاری..... ۶۷
- شکل ۴-۴ مورفولوژی پودر  $16\mu\text{m}$ -5%SiC-AL الف)  $10\%$ SiC-AL ب)  $10\%$ SiC-AL..... ۶۸
- شکل ۵-۴ مورفولوژی پودر الف)  $20\mu\text{m}$ -10%SiC-AL ب)  $12\mu\text{m}$ -10%SiC-AL پس از ۱۲ ساعت آسیاکاری..... ۶۸
- شکل ۵-۴ مورفولوژی پودر الف)  $20\mu\text{m}$ -10%SiC-AL ب)  $12\mu\text{m}$ -10%SiC-AL پس از ۱۲ ساعت آسیاکاری..... ۶۹



- شکل ۴-۶ مورفولوژی کامپوزیت‌های تفجوشی شده  $AL-10\%SiC-12\mu m$  پس از (الف) ۸ ساعت و (ب) ۱۲ ساعت آسیاکاری ..... ۷۰
- شکل ۴-۷ مورفولوژی کامپوزیت‌های تفجوشی شده (الف)  $AL-20\%SiC-16\mu m$  ، (ب)  $AL-10\%SiC-16\mu m$  ، (ج)  $AL-10\%SiC-20\mu m$  پس از ۱۲ ساعت آسیاکاری ... ۷۰
- شکل ۴-۸ الگوی XRD برای سه نمونه (الف) پودر  $AL-10\%SiC$  با اندازه  $16\mu m$  (ب) نمونه تفجوشی شده  $AL-10\%SiC$  با اندازه  $16\mu m$  (ج) نمونه تفجوشی شده  $AL-20\%SiC$  با اندازه  $16\mu m$  ..... ۷۲
- شکل ۴-۹ منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمون فشارش مرحله‌ای برای نمونه‌های آسیاکاری شده در زمانهای مختلف ..... ۷۵
- شکل ۴-۱۰ منحنی تنش-کرنش آزمون فشارش پیوسته برای نمونه‌های آسیاکاری شده در زمانهای مختلف ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۱ تغییرات ضریب چگالی لحظه‌ای با چگالی نسبی برای نمونه‌های آسیاکاری شده در زمان‌های مختلف در دو حالت تنش ..... ۷۷
- شکل ۴-۱۲ تغییرات توان کرنش سختی لحظه‌ای با چگالی نسبی برای نمونه‌های آسیاکاری شده در زمان‌های مختلف ..... ۷۸
- شکل ۴-۱۳ تغییر پارامتر تنش شکل‌پذیری با چگالی نسبی برای نمونه‌های آسیا شده در زمان‌های مختلف در حالت تنش سه محوره ..... ۷۹
- شکل ۴-۱۴ منحنی تنش-کرنش در درصدهای مختلف تقویت کننده حاصل از آزمون فشارش مرحله‌ای ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۵ منحنی تنش-کرنش نمونه‌های آسیاکاری شده در درصدهای مختلف تقویت کننده در فشارش پیوسته ..... ۸۱
- شکل ۴-۱۶ تغییرات ضریب چگالی لحظه‌ای با چگالی نسبی برای نمونه‌های دارای درصدهای مختلف تقویت کننده ..... ۸۱
- شکل ۴-۱۷ تغییرات توان کرنش سختی با چگالی نسبی برای نمونه‌های دارای درصدهای مختلف تقویت کننده ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۸ تغییرات پارامتر تنش شکل‌پذیری با چگالی نسبی برای درصدهای مختلف تقویت کننده در حالت تنش سه محوره ..... ۸۴

- شکل ۴-۱۹ منحنی تنش- کرنش حاصل از آزمون فشارش مرحله‌ای برای کامپوزیت‌های دارای  
اندازه متفاوت تقویت‌کننده ..... ۸۵
- شکل ۴-۲۰ منحنی تنش - کرنش حقیقی نمونه‌های دارای اندازه مختلف تقویت‌کننده در  
فشارش پیوسته..... ۸۵
- شکل ۴-۲۱ تغییرات ضریب چگالی لحظه‌ای با چگالی نسبی برای نمونه‌های آسیاکاری شده  
با اندازه‌های مختلف تقویت‌کننده..... ۸۶
- شکل ۴-۲۲ تغییرات توان کرنش سختی با چگالی نسبی برای نمونه‌های آسیاکاری شده در  
اندازه‌های مختلف تقویت‌کننده..... ۸۷
- شکل ۴-۲۳ تغییرات پارامتر تنش شکل‌پذیری با چگالی نسبی برای نمونه‌های دارای اندازه‌های  
مختلف تقویت‌کننده در حالت تنش سه محوره..... ۸۸
- شکل ۴-۲۴ منحنی تنش-کرنش حقیقی برای نمونه‌هایی با چگالی اولیه متفاوت حاصل از  
آزمون فشارش مرحله‌ای..... ۸۹
- شکل ۴-۲۵ منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها با چگالی اولیه متفاوت از آزمون فشارش پیوسته..... ۸۹
- شکل ۴-۲۶ تغییرات ضریب چگالی لحظه‌ای با چگالی نسبی برای نمونه‌های آسیاکاری شده با  
چگالی نسبی‌های مختلف..... ۹۰
- شکل ۴-۲۷ تغییرات توان کرنش سختی لحظه‌ای با چگالی نسبی برای نمونه‌های آسیاکاری  
شده با چگالی نسبی‌های مختلف..... ۹۱
- شکل ۴-۲۸ تغییرات پارامتر تنش شکل‌پذیری با چگالی نسبی برای نمونه‌های آسیاکاری شده  
با چگالی نسبی‌های مختلف در حالت تنش سه محوره..... ۹۲

## فهرست جداول

جدول ۱-۱	مشخصات پودرهای مصرفی	۵۸
جدول ۲-۱	پودرهای کامپوزیتی آسیا شده	۵۹
جدول ۳-۱	نمونه‌های کامپوزیتی برای آزمون فشار مرحله‌ای	۶۲
جدول ۴-۳	نمونه‌های کامپوزیتی برای آزمون فشار پیوسته	۶۴
جدول ۱-۴	اندازه دانه محاسبه شده به روش شرر برای نمونه های مختلف	۷۳

## چکیده

در این پژوهش رفتار فشاری کامپوزیت‌های متخلخل Al/SiC ساخته شده به روش آسیاکاری مکانیکی مطالعه شد. پودر Al مورد استفاده با اندازه دانه متوسط  $65\mu\text{m}$  و پودر SiC در سه اندازه ۱۲، ۱۶ و  $20\mu\text{m}$  بود. برای بررسی اثر زمان آسیاکاری سه نمونه دارای ۱۰wt.% تقویت‌کننده در اندازه‌ی  $12\mu\text{m}$  به مدت ۴، ۸ و ۱۲ ساعت آسیا شد. کامپوزیت‌های حاوی سه مقدار مختلف ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی SiC (اندازه ذره متوسط  $16\mu\text{m}$ ) و نمونه‌های دیگر با ۱۰٪ وزنی SiC در سه اندازه ۲ و نمونه پودر دیگر نیز با SiC wt.% ۱۰٪ در اندازه‌های ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میکرون با هدف تعیین اثر مقدار و اندازه ذرات تقویت‌کننده به مدت ۱۲ ساعت آسیاکاری شد. سپس پیش‌شکل‌هایی با نسبت ابعادی  $0/563$  با استفاده از قالب استوانه‌ای به قطر  $15\text{mm}$  در فشارهای  $315-350\text{ MPa}$  برای رسیدن به چگالی نسبی ۹۰٪ فشرده شد. دو نمونه‌ی دیگر نیز با چگالی نسبی ۸۷ و ۹۵ درصد از پودر Al-10%SiC ساخته شد. پس از تفجوشی، کامپوزیت‌ها تحت آزمونهای فشارش مرحله‌ای به همراه چگالی سنجی پس از هر مرحله تغییرشکل و فشارش پیوسته قرار گرفتند. بررسی‌ها نشان داد افزایش زمان آسیاکاری، افزایش مقدار ذرات تقویت‌کننده و کوچک شدن اندازه آن باعث افزایش استحکام و کاهش انعطاف‌پذیری می‌شود. ضریب چگالی لحظه‌ای و توان کرنش سختی لحظه‌ای کامپوزیت‌ها با افزایش چگالی حین تغییرشکل روند کاهشی داشت. توان کارسختی لحظه‌ای با افزایش زمان آسیاکاری، افزایش درصد وزنی و کاهش اندازه تقویت‌کننده افزایش یافت. نمونه‌های دارای چگالی اولیه بالاتر، اندازه SiC بزرگتر و مقدار SiC کمتر کارپذیری بهتری از خود نشان دادند.

کلمات کلیدی: کامپوزیت زمینه آلومینیم، متالورژی پودر، فشارش، کارپذیری

## فصل یکم

### مقدمه

شناخت و توسعه‌ی مواد جدید با قابلیت‌های بالا یکی از نیازهای ضروری جهت پیشرفت تکنولوژی و صنعت محسوب می‌شود. محققین در سراسر جهان سالانه مواد متنوع و جدیدی را معرفی می‌کنند که در جهت دستیابی به هدف و ویژگی خاصی طراحی، ساخته یا بهسازی شده‌اند. در همین راستا و در حال حاضر مطالعات گسترده‌ای بر روی مواد کامپوزیتی<sup>۱</sup> در حال انجام است.

در دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی تولید کامپوزیت‌ها به منظور کاربردهای خاص به ویژه استفاده در مواردی که مقاومت به خزش و خستگی مطرح بود، صورت می‌گرفت؛ ولی با تلاش‌های بسیاری که در زمینه‌ی طراحی روش‌های جدید تولید برای فراوری مواد پیشرفته و نیز تولید انبوه فازهای تقویت‌کننده نظیر  $B_4C$ ،  $Al_2O_3$  و  $SiC$  انجام پذیرفت، کامپوزیت‌های زمینه فلزی گسترش وسیعی پیدا کردند. امروزه کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا در صنایع خاصی نظیر اتومبیل‌سازی، نظامی و هوا - فضا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال در صنایع اتومبیل‌سازی، استفاده از کامپوزیت زمینه آلومینیمی در دیسک ترمز به دلیل کاهش وزن باعث کاهش مصرف سوخت و افزایش شتاب اتومبیل می‌شود. به علاوه قدرت

---

<sup>1</sup> Composite

بالای انتقال حرارت آن نسبت به دیسک ترمز ساخته شده با آلیاژ چدن طول عمر آن را افزایش می‌دهد [۱].

کامپوزیت‌های زمینه فلزی عموماً خواص مطلوبی نظیر استحکام و مدول الاستیک بالا دارند. حساسیت آن‌ها نسبت به شوک‌های حرارتی ناچیز و رسانایی حرارتی و الکتریکی‌شان مطلوب است. قابلیت میرایی ارتعاشات علاوه بر سفتی<sup>۱</sup>، سختی و مقاومت سایشی بالا از دیگر مزایای این مواد به شمار می‌رود. البته این خواص مطلوب در ازای کاهش انعطاف‌پذیری و چقرمگی حاصل می‌شود. با انتخاب مناسب فلز زمینه و فاز دوم از نظر شکل، اندازه و کسر حجمی می‌توان کامپوزیت‌هایی با خواص مطلوب تولید کرد.

باید توجه داشت که علی‌رغم مزایای فراوان، کامپوزیت‌ها معایبی نیز دارند که غیر یکنواختی خواص (به ویژه برای کامپوزیت‌های الیافی)، مشکلات بازیافت، قیمت بالای برخی از مواد فاز دوم و مشکلات جوشکاری از آن جمله‌اند. با وجود تحقیقات وسیع چهل سال اخیر در مورد تکامل کامپوزیت‌های زمینه فلزی ذره‌ای، هنوز استفاده از این مواد در صنایع مختلف محدود است. از دلایل این محدودیت‌ها عدم تکامل تکنولوژی‌های تولید، پرهزینه بودن اغلب روش‌های تولید، گران بودن برخی مواد اولیه و ... را می‌توان نام برد. ضمن این‌که تکنولوژی طراحی قطعات کامپوزیتی به نحوی که کمترین مقدار ماشین‌کاری را داشته باشد نیز فاکتور مهمی به شمار می‌رود [۲].

کامپوزیت‌های زمینه فلزی ذره‌ای از روش‌های مختلفی مثل فلزخورانی، رسوب‌دهی پاششی، متالورژی پودر و ریخته‌گری حالت مایع یا نیمه جامد تولید می‌شوند [۳]. در این میان روش‌های متالورژی پودر و ریخته‌گری گردابی علی‌رغم برخی محدودیت‌ها متداول‌ترند. در انتخاب یک روش مناسب برای تولید کامپوزیت زمینه فلزی، علاوه بر مسایل اقتصادی مواردی از قبیل خواص فیزیکی، شیمیایی و خصوصاً نقطه ذوب فاز زمینه و نیز خواص فیزیکی و شیمیایی فاز دوم، همچنین کسر حجمی، شکل و اندازه این فاز در رابطه با خواص مورد انتظار از کامپوزیت باید مد نظر قرار گیرند. در هر روش تولید چند پارامتر اساسی وجود دارد که کنترل و بهینه سازی آن‌ها با توجه به خواص ماده اولیه مورد استفاده سبب تولید ماده‌ای با خواص مطلوب می‌شود. در مورد کامپوزیت‌های زمینه فلزی ذره‌ای، عموماً توزیع یکنواخت فاز دوم، تناسب

---

<sup>1</sup> stiffness

بین فازها (وجود تطابق فیزیکی و شیمیایی بین آنها) و نیز نبود یا ناچیز بودن تخلخل سبب حصول خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب در محصول نهایی می‌شود.

بخش زیادی از تحقیقاتی که در سال‌های اخیر بر روی کامپوزیت‌های زمینه فلزی صورت گرفته، در زمینه‌ی توسعه‌ی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی بوده است. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های حاصل در به‌دست آوردن خواص مطلوب در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم با تقویت کننده‌های غیر پیوسته به ویژه خواص مکانیکی برجسته‌ی این دسته از مواد توجه بسیاری از تولیدکننده‌های مواد و مصرف کننده‌های نهایی را به خود جلب کرده است. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی تقویت‌شده با ذرات کاربید سیلیسیم با توجه به قیمت پایین ماده‌ی خام، امکان ساخت با فن‌آوری‌های مرسوم شکل‌دادن فلزات و خواص یکنواخت مکانیکی کاربردهای پیشرفته‌ی مهندسی پیدا کرده‌اند [۴ و ۵]. برای این دسته از کامپوزیت‌ها از دو فرآیند رایج ساخت ریخته‌گری و متالورژی پودر، روش متالورژی پودر به دلیل امکان کنترل دقیق‌تر ریزساختار فازها و نیز کنترل سینتیک بین فازی به علت دماهای کمتر تولید ترجیح داده می‌شود. زیرا در روش‌های ذوبی ساخت کامپوزیت  $Al/SiC$  مشکل عدم پایداری شیمیایی فصل مشترک آلومینیم و کاربید سیلیسیم و در نتیجه تشکیل برخی فازهای ناخواسته وجود دارد. این فازها بسته به شرایط مختلف ساخت نظیر میزان ماده تقویت‌کننده، دمای فرآیند و وضعیت سطح پودر تقویت‌کننده (نوع پوشش، عملیات حرارتی، اکسیدهای سطحی) متفاوت‌اند؛ فازهای تشکیل شده‌ی جانبی خواص نهایی کامپوزیت به ویژه خواص استحکامی را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۶ و ۷].

روش اصلی تولید قطعات ساختمانی به کمک متالورژی پودر شامل مخلوط کردن، فشردن سرد و تفجوشی<sup>۱</sup> متداول است. اغلب این روش برای موادی که به سختی ماشین‌کاری می‌شوند یا ریخته‌گری آنها به خاطر رفتار نامطلوب انجمادشان مشکل است؛ به کار می‌رود. آلیاژسازی مکانیکی<sup>۲</sup> یکی از متداولترین تکنیک‌های متالورژی پودر و شامل تکرار فرایند جوش خوردن و شکستن ذرات پودر در اثر ضربات متوالی گلوله‌های سرامیکی یا فلزی در داخل یک محفظه کنترل شده است. مهمترین کاربردهای روش آلیاژسازی مکانیکی عبارتند از تولید آلیاژ حقیقی با ترکیب همگن به ویژه در مواردی که اختلاف نقطه ذوب یا چگالی زیاد است؛ تولید

<sup>1</sup> sintering

<sup>2</sup> Mechanical alloying

ترکیبات بین فلزی که روش‌های مبتنی بر ذوب و انجماد به دلیل اختلاف زیاد نقاط ذوب عناصر اولیه و ترکیب بین فلزی و همچنین محدودیت‌هایی نظیر وقوع انجماد پری‌تکتیک و عدم یکنواختی ساختار محصول نهایی مناسب ساخت آن‌ها نیست؛ مواد دیرگداز که روش‌های متعارف تولید اغلب هزینه‌بر و محصول نهایی معمولاً غیر یکنواخت و حاوی عناصر باقیمانده اولیه است و تولید مواد آمورف. همچنین آلیاژ سازی مکانیکی روشی بسیار مفید برای تولید آلیاژهای تقویت شده با یکنواختی بسیار بالاست که یا مستقیماً با آسیا کردن مخلوط پودر فلز و پودر سرامیکی تولید می‌شود و یا اینکه عملیات به گونه‌ای انجام می‌گیرد که دو یا چند عنصر در پودر مواد اولیه با یکدیگر و یا با اتمسفر محفظه‌ی آسیا واکنش شیمیایی می‌دهند تا فاز سرامیکی دلخواه ایجاد شود. در حالت اخیر فاز سرامیکی با اندازه بسیار ریز (حدود چند نانومتر) تولید و به طور یکنواخت درون زمینه پخش می‌شود.

به هر حال قطعات متالورژی پودر به علت تخلخل باقیمانده نسبت به مواد کار شده از نظر انعطاف‌پذیری، انرژی ضربه‌ای و استحکام خستگی ضعیف‌ترند. برای بهبود خواص مکانیکی و دستیابی به خواصی مشابه قطعه‌ی کار شده باید تخلخل از بین برود. با تولید پیش‌شکل‌ها از پودر فلز و سپس انجام عملیات ثانویه مثل فورج یا اکستروژن روی آن‌ها می‌توان به این هدف دست یافت و قطعاتی با ابعاد کنترل شده و با چگالی زیاد یا نسبتاً زیاد تهیه کرد. قطعات متالورژی پودر استفاده‌ی گسترده‌ای در کاربردهای پیشرفته‌ی صنعتی دارند. عمومیت جهانی متالورژی پودر در قابلیت این روش برای تولید شکل‌های پیچیده با ابعاد دقیق، در نرخ تولید بالا و هزینه کم قرار می‌گیرد. فورج پیش‌شکل‌های متالورژی پودر اساساً ترکیبی از دو فرآیند رایج یعنی متالورژی پودر و فورج، یک تکنیک در حال رشد در تکنولوژی فلزکاری برای تولید اجزای دارای شکل و انحنای پیچیده است. استفاده از پیش‌شکل‌های متالورژی پودر تف‌جوشی شده به جای ماده اولیه به عنوان قطعه مزایایی مانند استفاده بهتر از ماده حین عملیات، کاهش یا حذف ماشین‌کاری، ایجاد شکل نهایی با یک ضربه فورج، یکنواختی ساختار و کاهش میزان جهت‌دار بودن خواص نسبت به قطعات فورج متداول دارد [۸ و ۹].

هر ساله حجم قابل ملاحظه‌ای از مواد با انواع روش‌های شکل دادن تولید می‌شوند. بنابراین به دست آوردن شناختی کامل از عواملی که میزان شکل‌پذیری فلزات را تحت تأثیر قرار می‌دهند و آزمون‌های تعیین رفتار مواد در عملیات شکل‌دهی امری ضروری است. آزمون فشارش تک‌محوره روشی است که برای تعیین کارپذیری مواد مختلف از جمله قطعات فورج شده‌ی متالورژی پودر به کار می‌رود [۹ و ۱۰].



در این پژوهش بر آنیم تا با بررسی رفتار کامپوزیت  $Al/SiC$  تولید شده به روش متالورژی پودر رفتار این ماده را در آزمون فشارش بررسی کنیم. پس از بیان این مقدمات درباره‌ی موضوعات مطرح شده در این مجموعه، در فصل دوم ابتدا به معرفی کاملتری از سیستم‌های کامپوزیتی و روش‌های ساخت آن‌ها، مفاهیم آلیاژسازی مکانیکی که در این پژوهش مورد استفاده بوده و بررسی فورج پودر به عنوان عملیاتی ثانویه برای بهبود خواص مکانیکی قطعات متالورژی پودر پرداخته شده است. سپس مروری بر تحقیقات گذشته در زمینه‌ی رفتار مواد متخلخل در آزمون فشارش انجام گرفته است. فصل سوم به بیان روش‌های عملی در این پژوهش اختصاص یافته و نتایج و بحث در فصل چهارم آورده شده است. در پایان نیز با توجه به نتایج بحث‌ها جمع‌بندی روی آن‌ها صورت گرفته و پیشنهادهاتی به امید برداشتن گام‌های مؤثرتر بعدی ارائه شده است.

## فصل دوم

# مروری بر منابع

### ۱-۲ معرفی کامپوزیت‌ها

کامپوزیت‌ها موادی مرکب با یک ساختار غیرهمگن‌اند که کارایی کامل‌تر از اجزای سازنده‌ی خود دارند. بدین معنی که هر جزء علاوه بر دارا بودن خواص خود، می‌تواند کاستی‌های جزء دیگر را تحت پوشش قرار دهد. در مباحث مهندسی کامپوزیت به ماده‌ای گفته می‌شود که [۱۱ و ۱۲]:

اجزای تشکیل دهنده در مقیاس اتمی نباشد.

ترکیب شیمیایی اجزا متفاوت از یکدیگر باشد.

اجزا از نظر شکل متفاوت باشند.

اجزای مختلف سیستم قابلیت انحلال در یکدیگر را نداشته باشند.

به طور کلی اجزای تشکیل‌دهنده عبارتند از یک فاز پیوسته به عنوان زمینه که توسط فاز دیگر که تقویت‌کننده نام دارد، تقویت می‌شود. فاز تقویت‌کننده معمولاً به شکل الیاف پیوسته<sup>۱</sup> یا غیرپیوسته، ویسکر<sup>۲</sup> و یا ذره‌ای است و سفتی و استحکام بیشتر از زمینه دارد. علت اصلی استفاده

---

<sup>۱</sup> Continuous Fiber

<sup>۲</sup> whisker

از فاز زمینه ایجاد پیوستگی و چسبندگی بین ذرات تقویت کننده است. از وظایف دیگر زمینه می-توان به توزیع و انتقال بار به تقویت کننده، محافظت تقویت کننده و کنترل خواص الکتریکی و شیمیایی اشاره نمود. فاز زمینه باید قابلیت تطابق با فاز دوم را داشته باشد و با پیوند مناسب با آن نقش حساس خود را در ساختار کامپوزیت ایفا نماید [۳۱].

کامپوزیتها را می توان با توجه به نوع زمینه به سه دسته ی عمده ی زمینه پلیمری، زمینه سرامیکی و زمینه فلزی تقسیم کرد. علاوه بر این گزارش هایی حاکی از وجود کامپوزیت هایی با زمینه ی بین فلزی و زمینه ی کربنی در طبقه بندی ها وجود دارد [۱۵-۱۳]. با توجه به کاربردهای بسیار زیاد نوع زمینه فلزی، این گروه از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

## ۲-۲ کامپوزیت های زمینه فلزی<sup>۱</sup>

### ۱-۲-۲ معرفی کامپوزیت های زمینه فلزی

هنوز هیچ تعریف جامع و مشخصی برای کامپوزیت های زمینه فلزی ارائه نشده است. در تعریف محافظه کارانه ای که ایوانتس<sup>۲</sup> و همکارانش ارائه داده اند، باید تقویت کننده ها در طول تاریخچه ی فرآیند، کاملاً از زمینه مجزا باشند [۱۶]. تفاوت عمده ی یک کامپوزیت زمینه فلزی با یک آلیاژ دو فاز یا چند فاز این است که در کامپوزیت فاز زمینه و فاز تقویت کننده با هم مخلوط می شوند، در حالی که در یک آلیاژ فاز دوم به صورت ذره ای و یا به صورت یک فاز مجزا ایجاد می گردد [۱۷]. در کامپوزیت های زمینه فلزی فاز زمینه عمدتاً یک آلیاژ و به ندرت فلز خالص و فاز تقویت کننده به صورت کربنی، فلزی و یا سرامیکی است [۱۸]. هدف از طراحی کامپوزیت های زمینه فلزی تلفیق ویژگی های مطلوب فلز با سرامیک و کاهش نقاط ضعف هر کدام از آنها به تنهایی است [۱۹ و ۲۰]. اضافه نمودن ذرات سرامیکی با مدول بالا به یک زمینه ی انعطاف پذیر و نرم ماده ای ایجاد می نماید که خواص مکانیکی آن میانگینی از خواص زمینه و فاز تقویت کننده سرامیکی است [۲۱]. آنها دارای چقرمگی مناسب، استحکام ویژه بالا، مقاومت به سایش زیاد، استحکام بالا، مدول الاستیک بالا، سفتی، هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، مقاومت خزشی، عدم جذب رطوبت و پایداری ابعادی هستند و بر خلاف فلز زمینه خود قابلیت استفاده در دمای بالا را دارند [۲۲].

<sup>۱</sup> Metal Matrix Composites (MMCs)

<sup>۲</sup> Evans

عوامل مؤثر در ایجاد ویژگی‌های متفاوت انواع کامپوزیت‌های زمینه فلزی عبارتند از [۲۳ و ۲۴]:

- خواص تقویت‌کننده، اندازه، شکل و ترتیب آرایش هندسی آنها
- کسر حجمی تقویت‌کننده
- خواص زمینه
- خواص فصل مشترک زمینه / تقویت‌کننده
- تنش‌های باقیمانده ناشی از پیشینه‌ی مکانیکی و حرارتی کامپوزیت
- کاهش اثر تقویت‌کنندگی فازهای تقویت‌کننده در اثر واکنش‌های شیمیایی در دماهای بالا
- خسارات مکانیکی طی فرآیندهای تولید.

### ۲-۲-۲ مکانیزم‌های استحکام بخشی کامپوزیت‌ها

در حالت کلی استحکام کامپوزیت‌های زمینه فلزی بیشتر از ماده زمینه تقویت نشده است. برای توجیه علت افزایش استحکام در اثر افزودن تقویت‌کننده به ماده‌ی زمینه تلاش‌های زیادی صورت گرفته است و نظریات مختلفی وجود دارد که دو دسته‌اند:

اول) استحکام بخشی مستقیم: در نتیجه‌ی انتقال نیرو از زمینه به تقویت‌کننده است. در کامپوزیت‌های زمینه فلزی اولین عملکرد تقویت‌کننده، تحمل بار اعمالی و نقش اصلی زمینه به عنوان عامل اصلی اتصال انتقال و توزیع بار وارده است. عمل انتقال نیرو به نوع پیوند فصل مشترک بین زمینه و فاز تقویت‌کننده بستگی دارد و پیوند نیز به نوع زمینه و نوع فاز تقویت‌کننده و روش ساخت وابسته است [۱۱ و ۲۵].

دوم) استحکام بخشی غیرمستقیم: در نتیجه‌ی اثری است که تقویت‌کننده ممکن است روی ریز ساختار زمینه یا نحوه‌ی تغییر شکل داشته باشد. بنابراین متغیرهای زیادی مانند آلیاژ زمینه، کسر حجمی و اندازه ذرات تقویت‌کننده و عملیات پیرسازی بر استحکام بخشی کامپوزیت‌ها اثر گذارند [۲۴]. بیان‌های متعددی برای توضیح اثر بخشی ذرات در زمینه‌ی فلزی وجود دارد که مهمترین آنها عبارتند از [۲۶]:

الف - مکانیزم استحکام بخشی اوروان<sup>۱</sup>: در این مکانیزم استحکام بخشی در اثر مسدود شدن حرکت نابجایی‌ها توسط ذرات صورت می‌گیرد. افزایش کسر حجمی ذرات برای یک اندازه دانه

<sup>1</sup> Orwan