

## چکیده

آلیاژهای آلومینومی تقویت شده با نانوذرات سرامیکی به عنوان موادی پیشرفته، با قابلیت و عملکرد مکانیکی بالا شناخته می شوند. نخستین ضرورت در دستیابی به خواص فوق العاده مکانیکی در این مواد، توزیع یکنواخت فاز استحکام بخش در زمینه می باشد. ترشوندگی نامناسب ذرات سرامیکی در مذاب فلزات، از موانع اصلی در دستیابی به توزیع یکنواختی از نانوذرات در زمینه کامپوزیت است، همچنین ابعاد نانوذرات این چالش را تشدید نموده و مجموعه این عوامل منجر به افت محسوسی در خواص مکانیکی کامپوزیت می شود. در تحقیق حاضر روشی نوین به منظور جلوگیری از کلوخه شدن نانوذرات آلومینا در مذاب آلومینیوم به کار گرفته شده و از جنبه های گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. نانوذرات آلومینا به صورت جداگانه با میکروذرات آلومینیوم و مس آسیا شده و مخلوط پودری حاصل به منظور تولید کامپوزیت  $1.5 \text{ vol.}\% \text{ Nano Al}_2\text{O}_3 - \text{A356}$  در فرآیند ریخته گری گردابی به مذاب آلومینیوم افزوده شده است. به منظور ارزیابی پارامترهای مختلف تولید بر خواص کامپوزیت، فرآیند آسیا کاری در بازه های زمانی ۱، ۴، ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت انجام شد. بارریزی نمونه ها در دو دمای مختلف  $750^\circ\text{C}$  و  $850^\circ\text{C}$  و به مدت زمان های مختلف هم زنی ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ دقیقه انجام گرفت. نسبت وزنی فاز فلزی به سرامیکی در فرآیند آسیا کاری ۰، ۱، ۱/۵ و ۲/۵ انتخاب گردید. به منظور بررسی اثر عملیات حرارتی بر عملکرد نانوکامپوزیت، عملیات حرارتی انحلال و پیرسازی بر روی نمونه ها در مدت زمان های متنوع صورت گرفت. به منظور ارزیابی پارامترهای فرآیند تولید کامپوزیت بر خواص نمونه ها، تست های مکانیکی سختی سنجی، کشش، فشار و سایش بر روی نمونه ها انجام شد. به منظور بررسی کیفیت توزیع نانوذرات و همچنین اندازه دانه زمینه، بررسی

تأثیر افزودن نانوذرات آلومینای پوشش داده شده ..... .

ریزساختاری به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدان انجام گرفت. با هدف ارزیابی رفتار شکست نانوکامپوزیت، مقاطع شکست نمونه های تست کشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن میزان اندکی از نانوذرات آلومینا به زمینه آلومینومی سبب بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی کامپوزیت ها در قیاس با خواص آلیاژ تقویت نشده، گشته است. پارامترهای متنوع تولید بر خواص مکانیکی کامپوزیت ها تاثیرات محسوسی برجای گذاشته است و در مواردی سبب ارتقاء ۵۰ درصدی در خواص استحکامی شده است. بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی مواد گویای تاثیر عوامل مختلف تولید بر توزیع نانوذرات در زمینه و ارتباط نزدیک بین این عوامل و خواص نهایی کامپوزیت است. بررسی مقاطع شکست نانوکامپوزیت نشان داد که رفتار شکست کامپوزیت در اکثر مواقع تابع شکست آلیاژ زمینه است.

واژه های کلیدی : کامپوزیت آلومینیم،  $Al_2O_3$ ، خواص مکانیکی، ریزساختار، شکست نگاری ، ریخته گری گردابی.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه .....	۱
۱-۱. مقدمه .....	۲
فصل دوم: مروری بر منابع .....	۷
۱-۲. مقدمه .....	۸
۲-۲. کامپوزیت های زمینه فلزی .....	۹
۱-۲-۲. فلزات و آلیاژهای فلزی به عنوان مواد زمینه .....	۱۲
۳-۲. دسته بندی کامپوزیت های زمینه فلزی .....	۱۴
۴-۲. کامپوزیت های زمینه آلومینیومی .....	۱۶
۱-۴-۲. انواع متنوع کامپوزیت های زمینه آلومینیومی .....	۱۷
۲-۴-۲. تاثیر فاز استحکام بخش سرامیکی بر زمینه آلومینیومی در AMC's .....	۲۲
۵-۲. کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات نانوالومینا .....	۲۶
۶-۲. تکنیک های تولید نانوکامپوزیت $Al - Al_2O_3$ .....	۲۹
۱-۶-۲. تکنیک های فاز مایع .....	۳۰
۲-۶-۲. بررسی خواص کامپوزیت $Al - nano Al_2O_3$ .....	۴۲
فصل سوم: مواد و روش تحقیق .....	۴۹
۱-۳. مقدمه .....	۵۰
۲-۳. مواد اولیه مورد استفاده .....	۵۱
۳-۳. فرآیند آسیا کاری .....	۵۲

تأثیر افزودن نانوذرات آلومینای پوشش داده شده ..... .

- ۳-۴. آماده سازی پودرها ..... ۵۳
- ۳-۵. فرآیند ریخته گری گردابی و ساخت نمونه های کامپوزیت ..... ۵۳
- ۳-۶. عملیات حرارتی ..... ۵۴
- ۳-۷. چگالی سنجی ..... ۶۰
- ۳-۸. تست سختی ..... ۶۰
- ۳-۹. تست کشش ..... ۶۱
- ۳-۱۰. تست فشار ..... ۶۱
- ۳-۱۱. تست سایش ..... ۶۲
- ۳-۱۲. بررسی ریزساختار ..... ۶۳
- ۳-۱۳. بررسی رفتار شکست نمونه ها ..... ۶۳
- فصل چهارم: نتایج و بحث ..... ۶۴
- ۴-۱. مقدمه ..... ۶۵
- ۴-۲. تولید مخلوط پودر تقویت کننده ..... ۶۵
- ۴-۳. تاثیر دمای بارریزی بر خواص کامپوزیت ..... ۶۹
- ۴-۳-۱. میزان تخلخل بر اساس تغییرات دمای بارریزی ..... ۶۹
- ۴-۳-۲. میکروساختار کامپوزیت ها ..... ۷۰
- ۴-۳-۳. مقادیر سختی ..... ۷۳
- ۴-۳-۴. تاثیر دمای بارریزی بر خواص کششی کامپوزیت ها ..... ۷۵
- ۴-۳-۵. بررسی استحکام فشاری نمونه ها ..... ۷۹
- ۴-۴. تاثیر زمان هم زنی بر خواص کامپوزیت ..... ۸۰

تأثیر افزودن نانوذرات آلومینای پوشش داده شده .....  
۸۰

۴-۴-۱. اثر زمان هم زنی مذاب بر میزان تخلخل نمونه ها ..... ۸۰

۴-۴-۲. اثر زمان هم زنی بر سختی نمونه ها ..... ۸۱

۴-۴-۳. تأثیر زمان هم زنی بر خواص کششی کامپوزیت ها ..... ۸۳

۴-۴-۴. تأثیر زمان همزنی بر خواص فشاری کامپوزیت ..... ۸۶

۴-۴-۵. تأثیر زمان هم زنی بر خواص سایشی کامپوزیت ..... ۸۸

۴-۵. تأثیر زمان آسیاکاری بر خواص کامپوزیت ..... ۹۲

۴-۵-۱. تغییرات تخلخل نمونه ها بر اساس زمان آسیا کاری ..... ۹۲

۴-۵-۲. اثر زمان آسیاکاری مخلوط پودری بر سختی ..... ۹۲

۴-۵-۳. تأثیر زمان آسیا کاری مخلوط پودری بر خواص کششی کامپوزیت ها ..... ۹۴

۴-۵-۴. تأثیر زمان آسیا کاری مخلوط پودری بر خواص فشاری کامپوزیت ها ..... ۹۵

۴-۶. تأثیر میزان مس در پودرها و زمان پیرسازی کامپوزیت ها بر خواص مکانیکی ..... ۹۷

۴-۶-۱. میزان تخلخل در نمونه های حاوی مقادیر مختلف مس ..... ۹۷

۴-۶-۲. اثر میزان مس و زمان عملیات حرارتی بر سختی نمونه ها ..... ۹۸

۴-۶-۳. تأثیر مقادیر مس و زمان پیرسازی بر خواص کششی کامپوزیت ها ..... ۹۹

۴-۶-۴. تأثیر مقادیر مس و زمان پیرسازی بر خواص فشاری کامپوزیت ها ..... ۱۰۱

۴-۷. بررسی رفتار شکست نانوکامپوزیت  $Al_2O_3 - A356$  ..... ۱۰۳

۱۰۷ فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ..... ۱۰۷

۱۰۸ نتیجه گیری ..... ۱۰۸

۱۰۹ پیشنهادات ..... ۱۰۹

۱۱۰ منابع و مراجع ..... ۱۱۰

## فهرست اشکال

عنوان شکل	صفحه
شکل ۱-۲. میکروساختار (a) کامپوزیت $Al-SiC_p$ ، (b) فیبرهای کوتاه در کامپوزیت زمینه $Al$ ، (c) کامپوزیت تقویت شده با فیبرهای پیوسته، (d) کامپوزیت $Al-SiC_p + graphite_p$ .....	۱۸.....
شکل ۲-۲. میکروساختار در نواحی بین فیبرها در کامپوزیت $Al-4.5Cu/Al_2O_3 fiber$ ،	۲۳.....
شکل ۲-۳. دو الگوی متداول توزیع نامطلوب ذرات در فرآیند هم زنی، (a): جمع شدن ذرات در مرکز بوته، (b) توزیع ذرات در دیواره بوته.....	۳۸.....
شکل ۲-۴. تأثیر میزان و ابعاد ذرات آلومینا بر میزان تخلخل در کامپوزیت.....	۴۳.....
شکل ۲-۵. تغییرات میزان سختی به ازای درصد وزنی و اندازه فاز استحکام بخش.....	۴۴.....
شکل ۲-۶. (a) استحکام تسلیم و (b) استحکام نهایی کششی میکرو و نانوکامپوزیت $Al-Al_2O_3$ ، فرآوری شده با روشهای ریخته گری گردابی و ترکیبی.....	۴۵.....
شکل ۲-۷. رفتار فشاری (a) نانوکامپوزیت و (b) میکروکامپوزیت $Al-Al_2O_3$ فرآوری شده با روش ریخته گری ترکیبی.....	۴۶.....
شکل ۲-۸. تأثیر انجام فرآیند آسیا کاری بر خواص کششی نانوکامپوزیت $Al-nano Al_2O_3$ .....	۴۸.....
شکل ۳-۱. مورفولوژی نانوپودرهای آلومینا.....	۵۱.....
شکل ۴-۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی (a) پودرهای مس آسیا نشده، (b) پودر $Al_2O_3-Cu$ پس از ۱۶ ساعت آسیاکاری شده، و (c) ۲۴ ساعت آسیا کاری، (d) عکس با بزرگنمایی بالا از سطح ذرات پودر های مخلوط.....	۶۷.....
شکل ۴-۲. نمایش گرافیتی وضعیت ذرات پودر کامپوزیت های حاوی نانوذرات (a) ساختار متداول و چالش برانگیز، (b) ساختار مطلوب.....	۶۸.....

تأثیر افزودن نانوذرات آلومینای پوشش داده شده ..... .

شکل ۳-۴. تصویر FESEM از میکروساختار کامپوزیت، (a) تصویر مرز دانه ها و (b) توزیع نانوذرات در کامپوزیت تقویت شده با  $Al - Al_2O_3$ ،  $750^\circ C$ ؛ (c) کلوخه ها در کامپوزیت تقویت شده با  $Cu - Al_2O_3$ ،  $750^\circ C$  و (d) توزیع نانوذرات در نمونه ریخته شده مشابه ..... ۷۱

شکل ۴-۴. سیلیسیم های اصلاح شده در اثر عملیات حرارتی در بزرگنمایی های (a) ۱۵۰۰ و (b) ۴۰۰۰۰ برابر ..... ۷۲

شکل ۵-۴. شماتیک قالب و نمونه سیلندری کامپوزیت ..... ۷۳

شکل ۶-۴. پروفایل سختی نمونه های ریخته شده در دماهای بارریزی متفاوت، (a)  $750^\circ C$ ، (b)  $850^\circ C$  ..... ۷۴

شکل ۷-۴. نمودار تنش- کرنش مهندسی کامپوزیت ها در دماهای مختلف بارریزی، (a) دمای  $750^\circ C$  و (b) دمای  $850^\circ C$  ..... ۷۷

شکل ۸-۴. نمودار تنش- کرنش فشاری کامپوزیت ها در دماهای مختلف بارریزی، (a) دمای  $750^\circ C$  و (b) دمای  $850^\circ C$  ..... ۷۹

شکل ۹-۴. پروفایل سختی نمونه ها در زمان های مختلف همزنی ..... ۸۲

شکل ۱۰-۴. تاثیر زمان های همزنی بر رفتار کششی کامپوزیت ها، (a) نمونه های حاوی مخلوط پودری، (a)  $Al - Al_2O_3$  و (b)  $Cu - Al_2O_3$  ..... ۸۴

شکل ۱۱-۴. تغییرات استحکام تسلیم و (b) مدول یانگ نمونه ها با افزایش زمان همزنی ..... ۸۵

شکل ۱۲-۴. پروفایل استحکام فشاری نمونه های کامپوزیتی، (a) نمونه های حاوی ذرات آلومینیوم (b) مس ..... ۸۷

شکل ۱۳-۴. تغییرات کاهش وزن، (b) و نرخ سایش با تغییر زمان همزنی ..... ۸۸

شکل ۱۴-۴. پروفایل (a) کاهش وزن و (b) نرخ سایش در مقاطع طولی نمونه های کامپوزیتی ..... ۹۰

شکل ۱۵-۴. کلوخه های ذرات سرامیکی در نمونه تهیه شده از انتهای میله های سرامیکی ..... ۹۱

تأثیر افزودن نانوذرات آلومینای پوشش داده شده ..... .

شکل ۴-۱۶. پروفایل سختی نمونه ها در زمان های مختلف آسیا کاری ، (a) کامپوزیت تقویت شده

با پودرهای  $Al - Al_2O_3$  و (b)  $Cu - Al_2O_3$  ..... ۹۳..

شکل ۴-۱۷. تغییرات UTS کامپوزیت ها با افزایش زمان آسیا کاری..... ۹۵

شکل ۴-۱۸. تغییرات استحکام فشاری کامپوزیت ها با افزایش زمان آسیاکاری (a) نمونه های حاوی

پودر آلومینیوم و (b) نمونه های حاوی پودر مس..... ۹۶

شکل ۴-۱۹. تأثیر میزان مس در مخلوط پودری بر میزان تخلخل در کامپوزیت ها..... ۹۸

شکل ۴-۲۰. اثر میزان مس و زمان عملیات حرارتی بر سختی نمونه ها..... ۹۹

شکل ۴-۲۱. تغییرات خواص کششی کامپوزیت های حاوی مقادیر مختلف مس در زمان های

مختلف پیرسازی..... ۱۰۰

شکل ۴-۲۲. تأثیر میزان مس و زمان پیرسازی بر خواص فشاری نانوکامپوزیت..... ۱۰۱

شکل ۴-۲۳. ساختارهای دندریتی در مقطع شکست در بزرگنمایی های مختلف..... ۱۰۳

شکل ۴-۲۴. ساختارهای شبه حفره در بزرگنمایی های مختلف..... ۱۰۴

شکل ۴-۲۵. (a) حفرات بزرگ ناشی از تخلخل گازی در سطح مقطع کامپوزیت (b) ساختارهای

سلولی در کنار ساختارهای شبه حفره..... ۱۰۵

شکل ۴-۲۶. ساختارهای شکست ترد در بزرگنمایی های مختلف..... ۱۰۶



## فهرست جداول

عنوان جدول	صفحه
جدول ۱-۲. فازهای سرامیکی متداول به کار گرفته شده در کامپوزیت ها زمینه فلزی.....	۱۵
جدول ۲-۲. تکنیک های متنوع تولید کامپوزیت های زمینه آلومینیومی.....	۲۱
جدول ۱-۳. ترکیب شیمیای پودر نانوالومینا.....	۵۱
جدول ۲-۳. ترکیب شیمیایی آلیاژ A356.....	۵۲
جدول ۳-۳. گراف نمونه های ریخته گری شده در دماهای متفاوت.....	۵۶
جدول ۳-۴. گراف نمونه های تهیه شده در زمان های مختلف بارریزی.....	۵۷
جدول ۳-۵. گراف نمونه های تهیه شده با زمان های مختلف آسیا کاری مخلوط پودری.....	۵۸
جدول ۳-۶. گراف نمونه های تهیه شده با مقادیر مختلف مس و زمان های مختلف عملیات حرارتی.....	۵۹
جدول ۳-۷. ابعاد نمونه های تست کشش (mm).....	۶۱
جدول ۴-۱. میزان تخلخل نمونه های با دماهای مختلف بارریزی.....	۶۹
جدول ۴-۲. داده های تست کشش در دماهای مختلف بارریزی.....	۷۸
جدول ۴-۳. میزان تخلخل نمونه های در زمان های مختلف هم زنی.....	۸۰
جدول ۴-۴. میزان تخلخل نمونه ها، در زمان های مختلف آسیا کاری پودرهای تقویت کننده.....	۹۲

## فصل اول

### مقدمه

## ۱-۱. مقدمه

امروزه تمایل به پژوهش در گرایش کامپوزیت های زمینه آلومینیومی که در گروه کامپوزیت های زمینه فلزی جای داده می شوند و اختصاراً AMMC<sup>۱</sup> نامیده می شوند، بخش گسترده ای از تلاش محققین را به خود اختصاص داده است. این اشتیاق ناشی از خواص مطلوب و ایده آل این مواد پیشرفته، همچون مکانیکی فوق العاده، نسبت استحکام به وزن بالا، شکل پذیری مناسب و مطلوب، قابلیت عملیات های حرارتی، تکنیک های استحکام بخشی متنوع و همچنین امکان توزیع مطلوب و مناسب ذرات مختلف سرامیکی استحکام بخش در زمینه آلومینیومی می باشد. لذا صنایع اتومبیل سازی و هوافضا و آن گروه از صنایع که در آن مسئله استحکام مواد در کنار وزن کم آن از اهمیت خاصی برخوردار است، مهمترین مصرف کنندگان این مواد هستند. استحکام بخشی زمینه آلومینیمی شکل پذیر با ذرات استحکام بخش سخت و مستحکم فاز ثانویه، همچون اکسیدها، کاربیدها، بوریدها و نیتریدها سبب ایجاد مجموعه ای از خواص فلزی و سرامیکی در این کامپوزیت ها شده است که در نهایت سبب بهبود و ارتقاء خواص فیزیکی و مکانیکی در ماده کامپوزیتی می شود. همچنین توزیع یکنواخت ذرات استحکام بخش و ریز دانه بودن فاز زمینه، ارتباط مستقیمی به بهبود و ارتقاء خواص مکانیکی کامپوزیت ها دارد. این ذرات دارای اشکال و ابعاد متنوعی می باشند که شکل، اندازه ذره و کسر حجمی ذرات به کار گرفته شده نقش موثری در خواص نهایی کامپوزیت خواهند داشت. در حقیقت یکی از مهمترین فاکتورها، فاصله بین ذرات استحکام بخش در زمینه است. ارتباط بین فواصل بین ذره ای  $\lambda$ ، اندازه ذرات  $d$  و کسر حجمی ذرات فاز استحکام بخش  $f_v$  را با فرض اینکه این ذرات

---

<sup>۱</sup> Aluminum metal matrix composite (AMMC)

مکعبی هستند و با فواصل یکسان و به صورت متناوب در زمینه پخش شده اند، می توان با فرمول زیر بیان نمود:

$$\lambda = d(f^{\frac{-1}{3}} - 1) \quad 1-1$$

معادله اخیر را می توان به عنوان یک معیار به منظور تعیین فواصل بین ذره ای، با تغییر کسر حجمی و اندازه ذرات فاز استحکام بخش به کار برد. به این ترتیب باید انتظار داشت خواص مکانیکی کامپوزیت با افزایش کسر حجمی و کاهش اندازه ذرات فاز استحکام بخش بهبود یابد [۱].

تحقیقات اولیه عموماً در مورد توزیع ذرات سرامیکی با ابعاد چندین میکرون و با کسر حجمی بالا در زمینه فلزی بوده است. مشاهده شده است که به کارگیری ذرات با ابعاد بزرگتر (در حدود ۱/۵ میکرون) منجر به افزایش فواصل بین ذره ای شده و سبب افت خواص استحکامی می شود. از سوی دیگر این ذرات به صورت میکرو متمرکزکننده های تنش<sup>۱</sup> عمل می کنند و این امر سبب افزایش گسستگی و شکست ترد در نواحی مجاور این ذرات در زمینه می شود. ذرات با ابعاد متوسط (بین ۰/۲ تا ۱/۵ میکرون) سبب ایجاد حفرات در زمینه خواهند شد که ناشی از عدم اتصال مناسب این ذرات با زمینه می باشد. تحقیقات نشان می دهد که ذرات با ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر اتصال مستحکم تر و مناسب تری با زمینه داشته و مکانی برای شکل گیری و آغاز حفره ها در ساختار نیستند [۲]. با توجه به دلایل ذکر شده مطالعه بر روی عملکرد کامپوزیت های تقویت شده بوسیله ذرات با ابعاد کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر حائز اهمیت بوده و کاربرد علمی و صنعتی خواهد داشت. نانوکامپوزیت ها گروه نوینی از مواد کامپوزیتی می باشند که ابعاد یکی از اجزای تشکیل دهنده آن کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر است. به کارگیری مقادیر حجمی بالاتر از ۵ درصد حجمی از نانوذرات سرامیکی، منجر به افت خواص مکانیکی در این مواد خواهد شد. کلوخه شدن نانوذرات مهمترین چالش و عامل اصلی افت خواص نانوکامپوزیت های تقویت شده با درصدهای حجمی بالای نانوذرات سرامیکی می باشد. برای دستیابی به خواص بهینه مکانیکی، نانوذرات باید تا حد امکان به صورت یکنواخت و به صورت مجزا در ساختار توزیع شوند. کلوخه شدن ذرات تنها مربوط به درصدهای بالای ذرات سرامیکی تقویت کننده نیست، بلکه این امر ناشی از عدم ترشوندگی این ذرات توسط مذاب فلزات و تمایل ذاتی این ذرات به جذب یکدیگر

<sup>۱</sup>Microconcentrators of stress

(به دلیل نیروهای الکترومغناطیسی) می باشد. به بیان دیگر کلوخه شدن نانوذرات پدیده ای است که حتی در مقادیر اندک فاز استحکام بخش در طی فرآیند تولید و در نهایت در ساختار مشاهده می شود، لکن میزان و شدت آن با توجه به کمیت فاز استحکام بخش متفاوت است. از این جهت که این پدیده تأثیر قابل ملاحظه ای در افت خواص مکانیکی کامپوزیت ها داشته است، تحقیقات متنوعی به منظور چیره شده بر این چالش انجام گرفته است. این تحقیقات در زمینه کامپوزیت های زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانوذرات سرامیکی خصوصاً  $SiC$  و  $Al_2O_3$ ، به دلایل کاربرد گسترده این مواد در صنایع هوا فضا و حمل نقل، بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته اند. اهمیت این موضوع از آنجا سرچشمه می گیرد که محققین و صنعت گران دریافته اند که قادر خواهند بود با مقادیر اندکی از نانوذرات سرامیکی (در حدود ۱ تا ۲ درصد) که به نحو مناسبی در ساختار توزیع شده اند، به خواص فوق العاده ای دست یابند که خواص مکانیکی را نسبت به کامپوزیت های مشابه که توسط مقادیر بیشتر میکروذرات تقویت شده اند، به نحو قابل ملاحظه ای بهبود می بخشد. با این وجود دست یابی به توزیعی مطلوب و یکنواخت از نانوذرات، چالشی اساسی در ساخت و ارتقاء این مواد می باشد.

در تحقیق حاضر، هدف تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانوذرات اکسید آلومینیوم یا آلومینا<sup>۱</sup> است. از میان روش های متنوع تولید کامپوزیت ها، تکنیک های متالورژی پودر و ریخته گری متداول تر از سایر روش های تولیدی می باشند. در قیاس با تکنیک های ریخته گری، توزیع نانوذرات در کامپوزیت های تولید شده با تکنیک متالورژی پودر مطلوب تر و یکنواخت تر است، با این وجود تکنیک های ریخته گری ساده تر، ارزان تر و در دسترس تر بوده و خصوصاً از دیدگاه تولید انبوه دارای مزیت نسبی و گاهی مطلق نسبت به روش های متالورژی پودر هستند [۴-۷]. با این وجود مهمترین چالش این روش ها ناتوانی در دست یابی به توزیع مناسب نانوذرات آلومینا در مذاب آلومینیوم است که این امر ناشی از عدم ترشوندگی ذاتی این سرامیک در مذاب آلومینیوم می باشد. از سوی دیگر، نسبت سطح به حجم بالای نانوذرات آلومینا سبب تشدید این چالش شده و امکان ترشدن نانوذرات را توسط مذاب فلز با چالش بزرگی روبرو ساخته است. محققین برای بهبود خاصیت ترشوندگی ذرات آلومینا در مذاب آلومینیوم روش های متعددی را پیشنهاد کرده اند. برخی از این روش ها مبتنی بر بهره گیری از عوامل مکانیکی در تولید، برای بهبود خاصیت ترشوندگی است، مانند

---

<sup>۱</sup> Alumina

آنچه که در روش های ریخته گری گردابی<sup>۱</sup> صورت می گیرد. تکنیک های اغتشاشی و لرزشی در مذاب مانند روش های متداول ارتعاشی مکانیکی توسط لرزاننده های<sup>۲</sup> مکانیکی و یا تکنیک های مبتنی بر ایجاد اغتشاش داخلی در مذاب با استفاده از امواج التراسونیک نیز با مکانیزمی مشابه به ترشوندگی نانوذرات در مذاب کمک می کنند. گروهی دیگر از روش ها مبتنی بر تغییر خواص فیزیکی سطحی نانوذرات برای بهبود ترشوندگی ذرات در مذاب هستند. تکنیک هایی همچون انجام عملیات های حرارتی بر روی ذرات که سبب تغییر زوایای سطحی در سطوح نانوذرات شده و ترشوندگی را بهبود می بخشد و یا تکنیک هایی که مبتنی بر اعمال یک پوشش سطحی بر روی سطح ذرات به منظور ارتقاع خاصیت ترشوندگی ذرات در مذاب است. در تحقیق حاضر از مجموعه ای از راهکارها به صورت یک تکنیک نوین ترکیبی برای تولید نانوکامپوزیت  $Al_2O_3/1.5\text{vol.}\%$  استفاده شده است. نانوذرات آلومینا با میکرو پودرهای آلومینیوم و مس به صورت جداگانه و در مدت زمان های مختلف، آسیا شدند تا وضعیت پودرهای سرامیکی در هنگام افزودن به مذاب با حالت خالص نانوذرات متفاوت باشد. برای بررسی اثر فرآیند آسیا کاری، نمونه های شاهد با پودرهای نانوالومینای خالص تهیه و نمونه های تولید شده با پودرهای ترکیبی مقایسه شدند. برای پخش ذرات در مذاب از تکنیک ریخته گری گردابی استفاده شد. همزدن ذرات در مذاب در زمان های مختلف و در دماهای متنوع انجام شد. مقادیر پودر مس به کارگرفته شده در فرآیند آسیا کاری متغیر بود تا تاثیر میزان فاز فلزی در فرآیند آسیا کاری بر خواص نهایی کامپوزیت سنجیده شود. همچنین عملیات انحلال و سختی سازی رسوبی در مدت زمان های متفاوت بر روی نمونه ها انجام شد تا به بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت در زمان های مختلف عملیات حرارتی بپردازد.

به منظور بررسی اثر پارامترهای فرآیند تولید کامپوزیت بر خواص مکانیکی، تست های سختی سنجی، کشش، فشار و سایش بر روی نمونه ها انجام گرفت. خواص مکانیکی نمونه ها در قسمت های مختلف یک نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت تا پروفایل خواص مکانیکی سنجیده شود. هدف از بررسی پروفایل خواص مکانیکی، ارزیابی نحوه توزیع ذرات در مقاطع مختلف نمونه ها است. به منظور بررسی کیفیت توزیع ذرات در کامپوزیت، از میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدان<sup>۳</sup> استفاده شد. برای

---

<sup>۱</sup> Stir Casting

<sup>۲</sup> Vibrator

<sup>۳</sup> Field Emission Scanning Electron microscope (FESEM)

درک رفتار شکست کامپوزیت، مقاطع شکست نمونه های کشش توسط میکروسکوپ الکترونی<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفت. سپس ارتباط بین نتایج تست ها و متغیرات فرآیند تولید بررسی شد.

در فصل دوم تحقیق حاضر ابتدا کامپوزیت ها زمینه آلومینیومی معرفی شده و سپس به صورت اختصاصی به معرفی کامپوزیت آلومینیومی تقویت شده با فاز سرامیکی نانو آلومینا پرداخته ایم و روش تولید به کار گرفته شده در این تحقیق را معرفی و مزایا و معایب آن را بررسی نموده ایم. در فصل سوم، فرآیند تولید و روند کار آزمایشگاهی شرح داده شده است. در فصل چهارم با توجه به نتایج حاصل از تست های مکانیکی به بررسی اثر متغیرات فرآیند تولید بر خواص مکانیکی کامپوزیت ها پرداخته شده است. سپس نتایج تحقیق به صورت کلی ارائه داده شده و در انتها پیشنهاداتی برای بهبود فرآیند تولید و همچنین ادامه تحقیقات ارائه شده است.

---

<sup>۱</sup> Scanning electron microscope (SEM)

## فصل دوم

### مروری بر منابع



## ۱-۲. مقدمه

امروزه کامپوزیت های زمینه فلزی از مهمترین و در عین حال متداولترین مواد پیشرفته مورد استفاده در صنعت و حتی زندگی روزمره می باشند. خواص ارتقاء یافته این مواد که ناشی از به کارگیری همزمان ذرات ، الیاف و انواع متنوع فازهای استحکام بخش سرامیکی در زمینه فلزی می باشد، سبب شده که است که جایگاه این مواد به سرعت در صنایع مختلف از جمله صنایع هوا فضا ، خودروسازی و سازه ای نمایان شود. با این وجود همواره نوع فرآیند تولیدی و چالش های پیش روی آن سبب شده است که توجه صنایع به بخش تحقیق و پژوهش در این زمینه بسیار چشمگیر باشد. این توجه منجر به پیشرفت روز افزون دانستنی های علمی محققین در خصوص شرایط تولید ، روش های متنوع تولید و دانسته های ما در مورد معایب و مزایای تکنیک های مختلف تولید شده است. با این وجود هنوز مجهولات علمی فراوانی از خواص این مواد پیش روی محققین قرار دارد که سبب گشته ، این گرایش از علم مواد بسیار مورد توجه محققین باشد. نانوکامپوزیت ها گروه نوینی از مواد کامپوزیتی هستند که ابعاد یکی از اجزای تشکیل دهنده آن نانومتری می باشد. در فصل حاضر به معرفی این مواد پیشرفته پرداخته و روش های تولید این مواد معرفی گردیده است. سپس به صورت اختصاصی به معرفی کامپوزیت آلومینیومی تقویت شده با فاز سرامیکی نانو آلومینا پرداخته، روش های تولید فاز مایع این مواد را شرح داده شده در مورد مزایا و معایب روش ها بحث شده است.

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

کامپوزیت ها را میتوان در یک تعریف کلی و عمومی موادی دانست که در آن اجزای مختلف کامپوزیت با یک اتصال و پیوند قوی به هم متصل شده اند. این تعریف رنج گسترده ای از مواد را شامل میشود، مانند چوب ها ، گاه گل ، اعضای بدن انسان، لایه های آهکی . اما در تعریفی صنعتی که توسط محققین علم مواد به کار می رود، کامپوزیت ماده ای است که از ترکیب فیزیکی اجزای آن که به صورت اولیه و مجزا تولید شده اند، حاصل می شود. به این ترتیب ماده جدیدی حاصل می شود که دارای خواص منحصر به فردی در قیاس با اجزای سازنده کامپوزیت می باشد. این تعریف مقیاسی مناسب برای تمایز بین مواد کامپوزیتی و سایر موادی است که توسط سایر مکانیزم ها استحکام دهی ، مستحکم شده اند، مانند موادی که مکانیزم استحکام بخشی آنها سختی سازی رسوبی است که توسط فرآیندهای تحول فازی تحت عناوین کلی پروسه های درجا<sup>۲</sup> تولید می شوند. کامپوزیت های زمینه فلزی مواد مرکبی هستند که در آنها زمینه فلزی پیوسته توسط ذرات و یا الیاف که در آنها جای گرفته است، تقویت شده اند. اولین کاربرد این مواد به سالهای ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ میلادی باز می گردد که یک کامپوزیت زمینه مسی توسط سیم های فولادی تقویت شده بود . این مواد برای اولین بار در صنایع هوا و فضا مورد استفاده قرار گرفتند. عملکرد مواد در صنایع هواپیمایی و شرایط بیرون و داخل اتمسفر جو بسیار حیاتی است. تغییرات دمایی بسیار شدید بین ۱۲۵+ تا ۱۲۵- در شرایط عبور از روشنایی به سایه ، در حین چرخش در مدار زمین سبب وارد شدن شک های شدید حرارتی به قطعات میشود [۸]. امروزه گرایش و تمایل فراوانی برای به کارگیری این مواد پیشرفته در صنایع اتومبیل سازی و هوافضا مشاهده می شود. مهمترین دلیل این گرایش داشتن خواص ترکیبی و ارتقاء یافته در این مواد است. در واقع خواص این مواد، ترکیبی مناسب و بهینه ای از خواص فیزیکی و مکانیکی فلزات همچون شکل پذیری بالا، چقرمگی<sup>۳</sup> و هدایت حرارتی بالا، در کنار خواص شاخص سرامیک ها همچون استحکام و سختی بالا، خواص سایشی شاخص و مقاومت حرارتی و شیمیایی ، می باشد. به این ترتیب کامپوزیت های زمینه فلزی موادی مستحکم و سفت<sup>۴</sup> و مقاوم به سایش و در عین حال چقرمه هستند که قابلیت شکل پذیری مطلوب دارند. بنا بر درخواست مصرف کننده و کاربرد ماده ، برخی از این خواص نسبت

<sup>۱</sup> Metal matrix composite

<sup>۲</sup> In situ Process

<sup>۳</sup> Toughness

<sup>۴</sup> Stiff

به خواص دیگر شاخص تر هستند. به عبارت دیگر مهندس مواد با علم به این خواص و همچنین نیازهای مهندسی، با ترکیب مواد مختلف فلزی و مواد فاز استحکام بخش، در درصد های حجمی متفاوت و با روش های متنوع تولید، به ماده پیشرفته جدیدی دست می یابند که بنا بر کاربرد آن بعضی از خواص فوق در آن مشهود تر است و برخی از خواص ضعیف تر میباشد. برای مثال در کامپوزیت های Al/SiC خواص سایشی و در کامپوزیت های Al/Alumina خواص استحکامی بارزتر از سایر خواص می باشد. به طور عمومی این کامپوزیت های دارای یک زمینه فلزی شکل پذیر (مانند مس، آلومینیم، تیتانیوم، نیکل، منیزیم) و ذرات سرامیکی استحکام بخش اکسیدی، کاربیدی، و نیتریدی (مانند آلومینا، کاربید سیلیسیم، بور، کاربید بور، نیتريد بور، گرافیت) و یا حتی ذرات فاز فلزی (مانند تنگستن، مولیبدن و سرب) هستند. اصطلاح زمینه<sup>۱</sup> معمولاً اشاره به یک فاز نرم در کامپوزیت دارد که دارای خواص عمومی داکتیلیتی، شکل پذیری و قابلیت هدایت حرارتی بالا باشد که ذرات سخت و فاز استحکام بخش که دارای خواص عمومی سفتی بالا و قابلیت هدایت حرارتی کم هستند، در آن پخش شده اند. با توجه به توضیحات ذکر شده، از خواص بارز کامپوزیت های زمینه فلزی، میتوان به خواص ارتقاء یافته استحکامی، سفتی<sup>۲</sup> و چقرمگی<sup>۳</sup>، خواص حرارتی، خواص سایشی و خزشی اشاره نمود. در قیاس با یک فلز سازه ای، کامپوزیت زمینه فلزی دارای خواص مطلوب تری می باشد که در زیر بیان شده است:

- نسبت استحکام به دانسیته بالاتر
- نسبت سفتی به دانسیته بالاتر
- خواص خستگی ارتقاء یافته
- خواص حرارتی ارتقاء یافته
- نرخ خزش کمتر
- خواص خزشی مطلوب تر
- ضریب انبساط حرارتی کمتر
- ارتقاء خواص میرایی ارتعاش و نوسان<sup>۴</sup>

---

<sup>۱</sup> Matrix

<sup>۲</sup> Stiffness

<sup>۳</sup> Toughness

<sup>۴</sup> Damping

با این وجود تمامی مزایای ذکر شده، این کامپوزیت ها معایبی دارند که تولید آنها را با چالش مواجه می سازد از جمله:

- قیمت بالاتر مواد اولیه

- روش های تولید به نسبت پیچیده تر و هزینه بر

از این مزایا و یا حتی معایب میتوان برای ارتقاء برخی از خواص کامپوزیت نیز بهره جست. برای مثال مدول الاستیک در آلومینیوم خالص در حدود  $70\text{ Gpa}$  است که میتوان با اضافه کردن  $60$  درصد حجمی از الیاف پیوسته آلومینا به این کامپوزیت مدول الاستیک را به میزان  $250\text{ Mpa}$  ارتقاء داد. از سوی دیگر همین تغییر سبب خواهد شد که ضریب انبساط حرارتی از  $24\text{ ppm}/^\circ\text{C}$  به  $7\text{ ppm}/^\circ\text{C}$  کاهش یابد. گرچه نیم قرن از ساخت اولین کامپوزیت های زمینه فلزی می گذرد، ولی با این وجود هنوز تحقیقات گسترده ای در راستای بهبود خواص این مواد، ارتقاء روش های تولید و کاهش هزینه ها انجام می گیرد، که این امر ناشی از نیاز صنایع به مواد با خواص ارتقاء یافته است [۹]. گستردگی مطالب در گرایش کامپوزیت ها بسیار وسیع است و زمینه های فراوانی برای تحقیق در این زمینه وجود دارد. خواص کامپوزیت ها به مقدار بسیار زیاد به مواد به کار رفته در آنها وابسته می باشد. این مواد که تحت عنوان مواد سازه ای<sup>۱</sup> شناخته می شوند به چند گروه عمده فلزات و سرامیک ها، شیشه ها و پلیمر ها دسته بندی و شناخته می شوند. مواد کربنی به دلیل خواص خاصی که دارند در یک گروه خاص گنجانده می شوند، ولی عموماً میتوان آنها را در گروه سرامیک ها جای داد. عموماً این تقسیم بندی مربوط به عملکرد نابجایی ها در این مواد می باشد. البته این معیار تقسیم بندی را نمی توان در مورد پلیمر ها به کار برد، لکن به دلیل استفاده گسترده این مواد به عنوان زمینه ی گروه عمده ای از کامپوزیت ها، نمی توان از آن چشم پوشی نمود. در این قسمت نمی خواهیم به بیان کلی خواص کامپوزیت ها بپردازیم، اما به شکل اجمالی به بیان خواص فلزات و سرامیک ها به عنوان دو جزء اصلی کامپوزیت های زمینه فلزی خواهیم پرداخت.

---

<sup>۱</sup>Structural Materials