

تولید کامپوزیت پایه آلومینیوم با روش آسیابکاری مکانیکی و مطالعه خواص آن

مریم عباسی^۱، سید عبدالکریم سجادی^۲ و مازیار آزادبه^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده علم مواد و مهندسی متالورژی، دانشگاه صنعتی سهند

۲- دانشیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار، دانشکده علم مواد و مهندسی متالورژی، دانشگاه صنعتی سهند

maryamabbasi86@gmail.com

چکیده

توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه از مهمترین پارامترهای مورد توجه در تولید کامپوزیت ها است. یکی از راهکارها برای رسیدن به این منظور استفاده از روش آسیابکاری مکانیکی در متالورژی پودر است. در نتیجه به دست آوردن شرایط آسیابکاری بهینه از اهمیت به سزایی برخوردار است. در این پژوهش سعی شده است تا شرایط بهینه آسیابکاری ذرات تقویت کننده Ni_3Al و پودر آلومینیوم جهت ساخت کامپوزیت $Al/5vol.\%Ni_3Al$ مورد بررسی قرار گیرد. از طرفی برای بررسی تأثیر نوع ذرات تقویت کننده بر خواص کامپوزیت زمینه آلومینیوم از دو نوع تقویت کننده اکسیدی و بین فلزی استفاده شده است. در نهایت از آن جایی که آسیابکاری مکانیکی باعث تغییر مورفولوژی و خواص پودرها می شود، تغییر در خواص کامپوزیت های تولید شده نیز انتظار می رود. مشاهده می شود انجام آسیابکاری مکانیکی در شرایط بهینه، باعث کاهش چگالی و افزایش سختی و استحکام نهایی می شود و همچنین ذرات تقویت کننده اکسیدی در مقایسه با ذرات بین فلزی باعث افزایش سختی کمتر ولی افزایش استحکام و داکتیلیتی چشم گیری می شوند.

واژه های کلیدی:

کامپوزیت، آسیابکاری مکانیکی، ذرات تقویت کننده، خواص فیزیکی و مکانیکی.

۱- مقدمه

آلیاژی یا به عنوان زمینه کامپوزیت و یا ترکیبی از این دو استفاده می شود تا از خواص مکانیکی بهتری برخوردار باشد. بر همین اساس کامپوزیتهای زمینه فلزی (MMCs) و به خصوص کامپوزیتهای زمینه آلومینیوم (AMC) طی دو دهه گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱ و ۲].

اولین نیاز یک کامپوزیت برای نشان دادن کارایی بالای آن، توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده است. آگلومره شدن ذرات

در ساخت کامپوزیتهای زمینه فلزی گستره وسیعی از فلزات و آلیاژها مانند آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای مس، چدن، فولاد، آلیاژهای منیزیم، سوپر آلیاژهای پایه نیکل، آلیاژهای تیتانیوم، آلیاژهای روی و ... کاربرد دارند. استحکام و سختی و سایر خواص مکانیکی آلومینیوم نسبت به فلزاتی چون آهن، نیکل و تیتانیوم ضعیف تر می باشد. لذا از آلومینیوم صرفاً به صورت

حجمی ذرات تقویت کننده کامپوزیت مورد نظر با ذرات اکسید آلومینیوم نانومتری جایگزین شده و تأثیر آن بر ریزساختار کامپوزیت مورد بررسی قرار می گیرد. برای بررسی تأثیر ذرات تقویت کننده بین فلزی و همچنین حضور هم زمان ذرات اکسیدی و بین فلزی، کامپوزیتهایی با ترکیب $Al/5 \text{ vol.}\% Ni_3Al$ و $Al/5 \text{ vol.}\% (Ni_3Al + Al_2O_3)$ انتخاب شدند.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق برای تولید پودر کامپوزیت $Al/5 \text{ vol.}\% Ni_3Al$ و $Al/5 \text{ vol.}\% (Ni_3Al + Al_2O_3)$ از آلومینیوم با خلوص بیش از ۹۹ درصد و اندازه دانه کمتر از $160 \mu m$ ساخت شرکت Merck آلمان و ذرات تقویت کننده اکسید آلومینیوم با ابعاد $27-43 \text{ nm}$ و با خلوص 99.5% ساخت شرکت Texas آمریکا استفاده شد. پودر Ni_3Al نیز به روش آلیاژسازی مکانیکی از آسیابکاری پودرهای Ni و Al به مدت ۱۵ ساعت با استفاده از یک آسیاب ماهواره ای پراثری تهیه گردید [۸]. برای تولید پودر کامپوزیت $Al/5 \text{ vol.}\% Ni_3Al$ ، ۵ درصد حجمی ذرات تقویت کننده Ni_3Al و ۹۵ درصد پودر آلومینیوم در شرایط مخلوط سازی، ۱۲ ساعت و ۱۸ ساعت آسیابکاری، با سرعت های ۲۰۰ و ۳۰۰ دور بر دقیقه و نسبت گلوله به پودر ۶:۱ و ۱۵:۱ آسیابکاری شدند. همچنین شرایط مخلوط سازی کم انرژی به عنوان صفر ساعت آسیابکاری منظور گردید. آسیابکاری در محیط آرگون و به وسیله گلوله های فولاد زنگ نزن انجام شد. همچنین جهت بررسی تأثیر نوع تقویت کننده بین فلزی یا اکسیدی بر خواص آلومینیوم، ۲/۵ درصد حجمی Ni_3Al و ۲/۵ درصد حجمی آلومینیوم آسیابکاری شدند. برای بررسی تأثیر تقویت کننده ها بر آلومینیوم، نمونه هایی از آلومینیوم خالص نیز تحت شرایط کاملاً مشابه تولید شد. سپس مخلوط پودر آلومینیوم و ذرات تقویت کننده با دستگاه پرس تک محوری تحت فشار 800 MPa فشرده شد. به منظور بررسی تأثیر نوع تقویت کننده بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت، نمونه های خام در دمای 620 درجه سانتی گراد در

تقویت کننده باعث افت خواص مکانیکی می شود. آسیابکاری با انرژی بالا روشی است که توزیع ذرات بسیار همگنی را ایجاد می کند و به همین دلیل در سال های اخیر برای تولید کامپوزیتهای پایه فلزی گسترش یافته است. آسیابکاری مکانیکی (MA) یک فرآیند پودر حالت جامد است که شامل تکرار تغییر فرم و شکست و دوباره جوش خوردن ذرات پودر در آسیابکاری مکانیکی پراثری است. MA در ابتدا برای تولید سوپرآلیاژهای پایه نیکل و آهن تقویت شده با توزیع اکسید برای کاربردهای فضایی گسترش یافت ولی در حال حاضر توانایی ساخت محدوده وسیعی از فازهای آلیاژی متعادل و غیرمتعادل از عناصر مخلوط شده یا پودرهای پیش آلیاژی شده را دارا می باشد [۳].

با اضافه کردن پودرهای سرامیکی به آلومینیوم و انجام آسیابکاری، ذرات سرامیکی در مقیاس نانومتری در زمینه آلومینیوم پخش می شوند که باعث کاهش اندازه دانه ها و قفل شدن نابعایی ها در زمینه آلومینیوم می شوند. لذا استحکام، سختی، خواص دمای بالا و سایر خواص مکانیکی آلومینیوم بهبود می یابد. این کامپوزیتهای در صنایع هوافضا، صنایع نظامی و خودروسازی کاربرد فراوانی دارند [۴، ۵ و ۶].

افزودن ترکیبات بین فلزی به آلومینیوم نیز به علت سختی و قابلیت سازگاری بالای آن ها مفید است. از طرفی، مقاومت به خوردگی و رفتار سایشی نیز بهبود می یابد که تمام این پدیده ها مربوط به فصل مشترک زمینه و تقویت کننده است. از خانواده بین فلزی ها (ترکیبات آهن، آلومینیوم و نیکل)، Ni_3Al یکی از انواع شناخته شده است [۷] که تولید آن به روش متالورژی پودر منجر به ساخت موادی با استحکام زیاد و قابلیت اطمینان بالای تولید می شود.

بر اساس مطالعات تئوری چون مکانیزم استحکام بخشی ذرات تقویت کننده نانومتری و میکرومتری متفاوت و مجزا از یکدیگر می باشد، حدس زده می شود در اثر حضور هم زمان ذرات اکسیدی نانومتری و بین فلزی میکرومتری بهترین خواص حاصل شود. از آن جایی که تاکنون این موضوع مورد ارزیابی قرار نگرفته است، به منظور بررسی صحت این ادعا نیمی از درصد

۳- نتایج و مباحث

۳-۱- تولید پودر تقویت کننده Ni₃Al

همانطور که در بخش قبل اشاره شد ذرات تقویت کننده Ni₃Al با روش آسیابکاری مکانیکی تولید شد. از آن جایی که انتخاب صحیح مدت زمان فرآیند آلیاژسازی جهت دستیابی به پودری با بهترین مورفولوژی و خواص از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، مشخصات ساختاری پودر Ni₃Al آسیابکاری شده در زمان‌های ۱ تا ۵۵ ساعت در تحقیقات پیشین نویسنده مورد بررسی کامل قرار گرفت [۸]. بنا بر نتایج به دست آمده پودر Ni₃Al تولید شده با زمان آسیابکاری ۱۵ ساعت دارای ریزساختاری با کمترین اندازه دانه و کمترین کرنش درون شبکه‌ای می‌باشد [۸]. شکل (۱) الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) آلومینیوم و نیکل را پس از آسیابکاری در زمان‌های آلیاژسازی صفر و ۱۵ ساعت نشان می‌دهد. طبق محاسبات انجام شده بر اساس روش ویلیامسون - هال [۹]، اندازه دانه و میزان کرنش پودر Ni₃Al تولید شده با ۱۵ ساعت آسیابکاری به ترتیب ۴/۸۱ نانومتر و ۰/۰۰۵٪ می‌باشد.

۳-۲- پودر کامپوزیتی Al/5vol.% Ni₃Al

جهت مخلوط‌سازی ذرات تقویت کننده Ni₃Al و پودرهای آلومینیوم، فرآیند آسیابکاری مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهای اصلی در فرآیند آسیابکاری پودرهای آلومینیوم و ذرات تقویت کننده شامل زمان آسیابکاری، سرعت آسیابکاری و نسبت گلوله به پودر در فرآیند است که تأثیر هر کدام از این متغیرها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل (۲) الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به پودرهای کامپوزیتی مخلوط شده و آسیابکاری شده در زمان‌های ۱۲ و ۱۸ ساعت را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در این فرآیند تغییر ترکیب شیمیایی اتفاق نمی‌افتد. محاسبه اندازه دانه و کرنش‌های درون شبکه‌ای با استفاده از روش ویلیامسون - هال نشان می‌دهد که با افزایش زمان آسیابکاری اندازه دانه‌های Al و Ni₃Al کاهش می‌یابد و کرنش‌های درون شبکه‌ای افزایش

کوره مدل SA با خلا تقریبی Torr 5×10^{-4} به مدت ۳۰ دقیقه تفجوشی شدند. آنالیز XRD به وسیله دیفراکتومتر Bruker: Advance-D8 و با تابش اشعه Cu(k_α) برای بررسی اندازه دانه و پارامتر شبکه و عیوب ایجاد شده در اثر آلیاژسازی در زمان‌های متفاوت انجام پذیرفت. روش ویلیامسون - هال جهت محاسبه پارامترهای ذکر شده مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی‌های ریزساختاری از میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل LEO 440 I) استفاده شد.

جهت بررسی تغییرات چگالی، چگالی خام و نهایی نمونه‌ها به دو روش هندسی و غوطه‌وری در آب بر حسب قانون ارشمیدس محاسبه گردید. برای ممانعت از نفوذ آب داخل حفره‌ها در هنگام غوطه‌وری، ابتدا بایستی سطح نمونه‌ها توسط یک لایه بسیار نازک روغن آغشته شود، سپس چگالی طبق رابطه (۱) محاسبه شود.

$$\rho = M_1 / (M_2 - M_3) \quad (1)$$

M₁: جرم نمونه وزن شده در هوا

M₂: جرم نمونه آغشته به روغن وزن شده در هوا

M₃: جرم نمونه غوطه‌ور در آب

ρ: چگالی نمونه

در محاسبات چگالی نسبی، چگالی تئوری نمونه‌های کامپوزیتی از رابطه (۲) محاسبه می‌شود که x_i درصد فاز i در نمونه و ρ_i چگالی فاز i است.

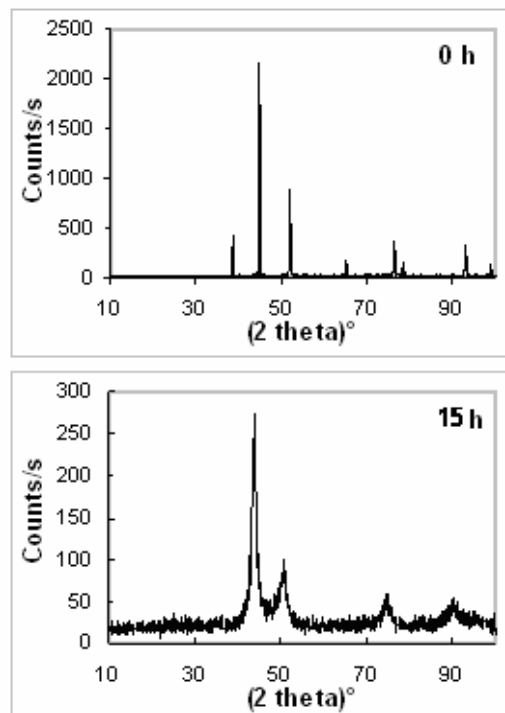
$$\rho = \sum \rho_i \times x_i \quad (2)$$

سختی نمونه‌ها به وسیله سختی‌سنجی ویکرز با بار ۳۰ کیلوگرم نیرو از میانگین ۹ اندازه‌گیری برای هر نمونه به وسیله دستگاه ماکرو سختی‌سنجی (مدل DVRB) تعیین گردید.

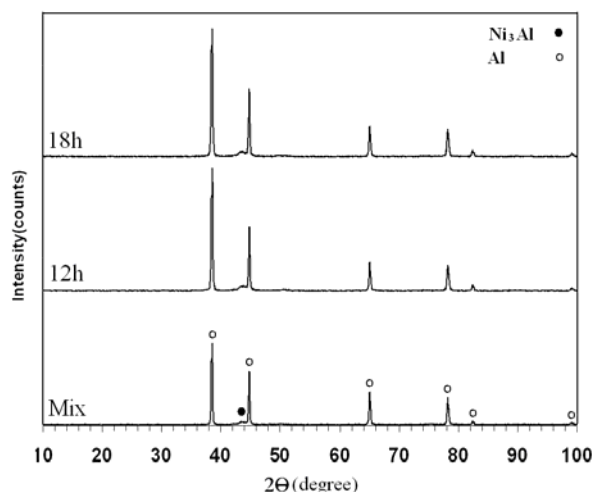
آزمون‌های فشار به وسیله دستگاه تست فشار و کشش (مدل Zwick/z250) طبق استاندارد ASTM E9 با نسبت ارتفاع به قطر نمونه‌ها ۱/۵ انجام شد. سرعت کرنش $10^{-4} s^{-1}$ و آزمون تا افت ناگهانی تنش که مرحله شکست در نظر گرفته شده، ادامه می‌یابد. برای کاهش اصطکاک در سطوح بین فک دستگاه و نمونه از روان‌ساز گریس استفاده می‌شود.

ذرات تقویت کننده به خوبی در پودر آلومینیوم توزیع نشده است. به طوری که دیده می شود ذرات تقویت کننده به صورت آگلومره با اندازه بزرگ در حدود ۵۰ میکرون به صورت غیر همگن در بین ذرات پودر آلومینیوم قرار گرفته اند. در حالی که با آسیابکاری این پودرها، در اثر برخورد گلوله های آسیاب با ذرات پودر آلومینیوم و تقویت کننده، توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه ایجاد می شود. پودرهای آلومینیوم چون نرم هستند دچار تغییر فرم پلاستیک می شوند و ضخامت ذرات پولکی کاهش می یابد ولی ذرات تقویت کننده Ni_3Al چون نسبت به آلومینیوم تردتر هستند در اثر آسیابکاری می شکنند.

جهت بررسی تأثیر سرعت آسیابکاری، از زمان آسیابکاری ۱۸ ساعت و نسبت گلوله به پودر ۶:۱ استفاده شده است تا تفاوت در نتایج به دست آمده در شکل (۴) نشان داده شده است. مشاهده می شود در سرعت ۲۰۰ rpm اندازه ورقه های پودر آلومینیوم به نسبت درشت است و فرآیند جوش سرد بین ذرات کامل نشده است. به طوری که ذرات پودر به صورت مجزا از همدیگر قرار گرفته اند. این باعث می شود تا ذرات تقویت کننده توزیع یکنواختی نداشته باشند. در نتیجه فرآیند مخلوط سازی به صورت مطلوب صورت نمی گیرد. با افزایش سرعت آسیاب چون انرژی وارد شده به سیستم در واحد زمان به صورت محسوسی افزایش می یابد، خرد شدن ذرات پودر و جوش سرد بین آنها به شدت افزایش می یابد. در سرعت آسیابکاری ۳۰۰ rpm، پودرهای پولکی ریز آلومینیوم و ذرات تقویت کننده که در بین این ورقه ها قرار گرفته اند ذرات پودر کامپوزیتی را تشکیل می دهند. مورفولوژی پودرهای حاصل ریزتر و همگن تر می شود و ذرات تقویت کننده به صورت کاملاً یکنواخت در زمینه توزیع می شوند. به بیان دیگر در سرعت ۳۰۰ rpm ساختار پودری با توزیع ذرات تقویت کننده یکنواخت حاصل می شود و نیازی به سرعت آسیابکاری بالاتر وجود ندارد. از طرفی انتظار می رود که افزایش سرعت آسیابکاری بیشتر از ۳۰۰ rpm منجر به واکنش ذرات



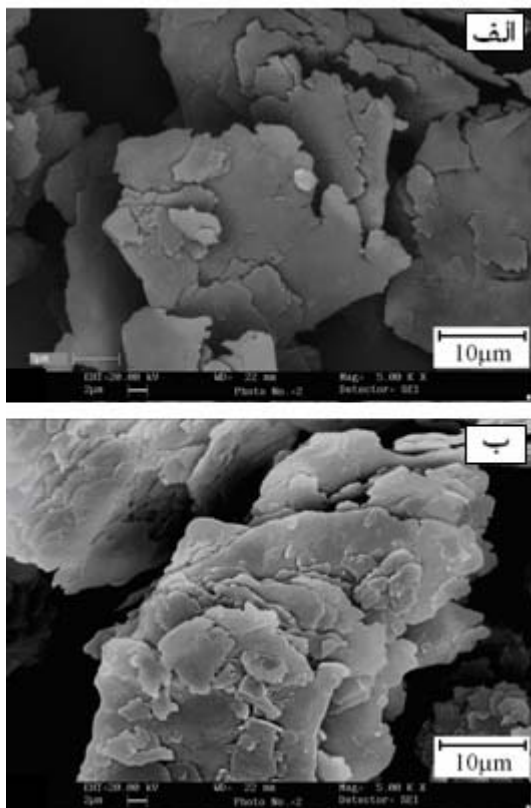
شکل (۱): الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودرهای آلومینیوم و نیکل در زمان های متفاوت آلیاژسازی به منظور تولید ذرات تقویت کننده Ni_3Al .



شکل (۲): نمودار پراش پرتو ایکس پودر کامپوزیتی Al/5 vol. % Ni_3Al تهیه شده به روش آسیابکاری، در زمان های متفاوت.

جزئی را نشان می دهد.

بررسی مورفولوژی پودرها (شکل ۳) نشان می دهد در شرایط مخلوط کردن پودر آلومینیوم و پودر تقویت کننده Ni_3Al ،

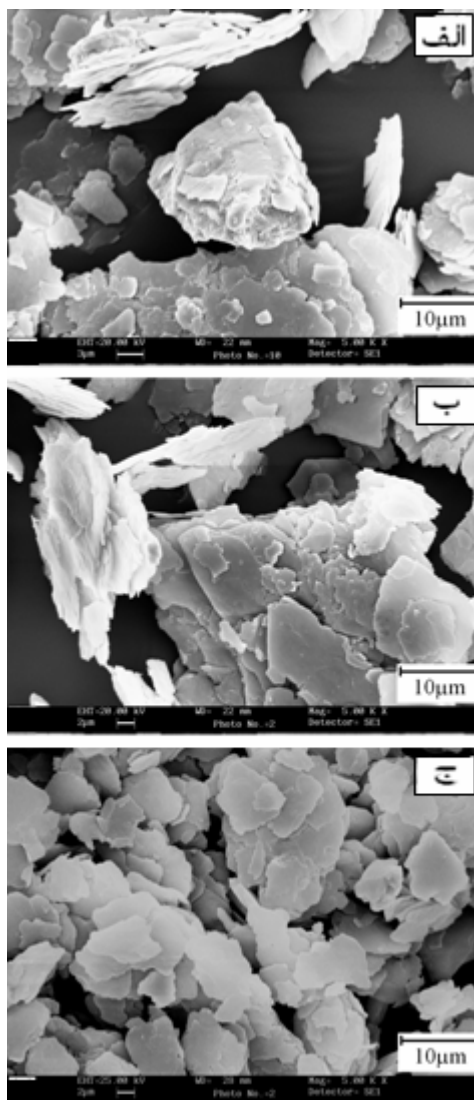


شکل (۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر کامپوزیتی Al/5 vol.% Ni₃Al تولید شده با سرعت‌های متفاوت، (الف): ۲۰۰ rpm و (ب): ۳۰۰ rpm.

بیشتر توسط گلوله‌ها به پودر در واحد زمان می‌شود. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود ضربات بیشتر در نسبت گلوله به پودر بالاتر باعث افزایش شکست پودرها شده‌است و اندازه پودرها را ریزتر کرده‌است. مورفولوژی پودرها همچنان به صورت پولکی است.

۳-۳- پودر کامپوزیتی Al/5 vol.% (Ni₃Al + Al₂O₃)

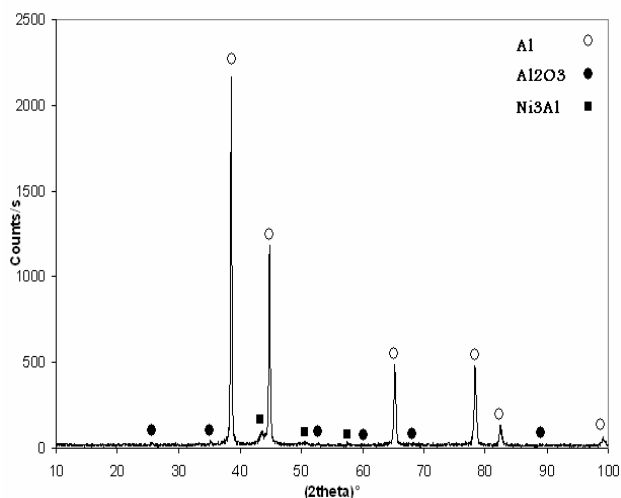
به منظور بررسی تأثیر نوع و اندازه ذرات تقویت کننده بر فرآیند آسیابکاری و تولید کامپوزیت آلومینیوم و مقایسه آن با ذرات تقویت کننده بین فلزی از پودر اکسید آلومینیوم با اندازه ۲۷-۴۳ nm استفاده شده‌است. در شکل (۶) پراش پرتو ایکس پودر کامپوزیتی Al/5 vol.% (Ni₃Al + Al₂O₃) آسیابکاری شده تحت شرایط بهینه (۱۲ ساعت آسیابکاری با سرعت ۳۰۰ و نسبت گلوله به پودر ۱:۱۵) نشان داده شده‌است. دیده می‌شود که



شکل (۳): مورفولوژی پودر کامپوزیت Al/5 vol.% Ni₃Al، (الف): پودر مخلوط شده، (ب): ۱۲ ساعت آسیابکاری شده و (ج): ۱۸ ساعت آسیابکاری شده در روش آسیابکاری سرعت ۳۰۰ rpm و نسبت گلوله به پودر ۱:۱۵ بوده‌است.

تقویت کننده و زمینه شود که خواص کامپوزیت را تغییر خواهد داد.

همانطور که اشاره شد نسبت گلوله به پودر نیز یکی دیگر از متغیرهای مؤثر روی خواص پودر حاصله است. مشاهده می‌شود که در سرعت آسیابکاری ۳۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۸ ساعت، آسیابکاری با نسبت گلوله به پودر بیشتر باعث اعمال ضربات

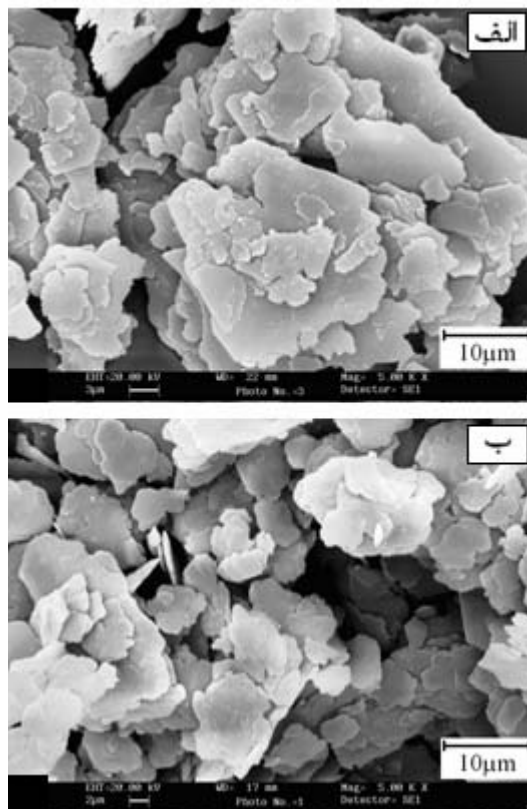


شکل (۶): پراش پرتو ایکس مخلوط پودر کامپوزیتی $\text{Al/5 vol. \% (Ni}_3\text{Al+Al}_2\text{O}_3)$ تهیه شده به روش آسیابکاری، مدت ۱۲ ساعت با سرعت ۳۰۰ و نسبت گلوله به پودر ۱۵:۱.

در حین آسیابکاری و آلیاژسازی مکانیکی هنگامی که تغییر فرم به حد بحرانی برسد جوش سرد اتفاق می افتد. در اثر وجود ذرات تقویت کننده سرامیکی که نسبت به ذرات بین فلزی از سختی بیشتری برخوردارند، در حین جوش خوردن تغییر فرم موضعی پودر زمینه اطراف ذرات تقویت کننده افزایش می یابد که فرآیند جوش خوردن ذرات را بهبود می بخشد. از طرفی تغییر فرم موضعی شدید و به دنبال آن سخت شدن بیشتر، منجر به تسهیل در فرآیند شکست می شود. به همین علت در حضور ذرات تقویت کننده سخت، فرآیند آلیاژسازی مکانیکی به زمان کمتری نیاز دارد. دلیل دیگری که می توان برای کوتاه شدن فرآیند آلیاژسازی در حضور ذرات تقویت کننده سرامیکی بیان کرد این است که ذرات ترد تقویت کننده در فرآیند به عنوان گلوله های آسیاب کوچک عمل می کنند که انرژی سیستم را بهبود می دهد و در نتیجه زمان لازم برای رسیدن به حالت پایدار کاهش می یابد.

۳-۴- خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیتها

پودرهای کامپوزیتی $\text{Al/Ni}_3\text{Al}$ و $\text{Al/(Ni}_3\text{Al+Al}_2\text{O}_3)$ آسیابکاری شده تحت شرایط بهینه، با فشار ۸۰۰ MPa فشرده و در دمای ۶۲۰ درجه سانتی گراد تفجوشی شدند. تصاویر



شکل (۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر کامپوزیتی $\text{Al/5 vol. \% Ni}_3\text{Al}$ تهیه شده به روش آسیابکاری با نسبت گلوله به پودر متفاوت در بزرگنمایی های مختلف، (الف): ۶:۱ و (ب): ۱۵:۱.

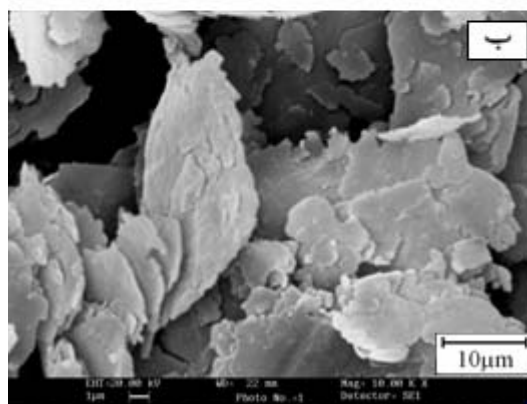
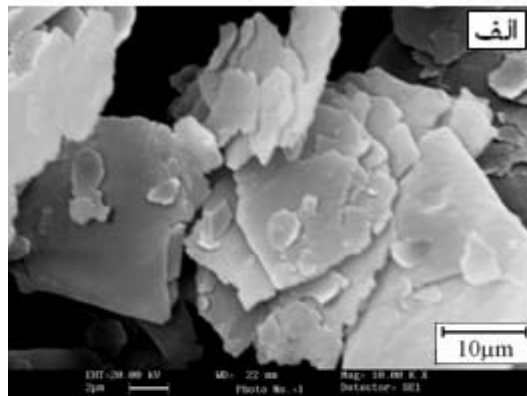
چون ذرات اکسید آلومینیوم استفاده شده نانومتری بوده اند شدت پیک های مربوط به آن کم است. حضور ذرات اکسید آلومینیوم همچنین باعث کاهش شدت پیک های آلومینیوم و پهن شدن آنها شده است و اندازه دانه آلومینیوم را از ۶۸ به ۵۱ نانومتر و میزان کرنش های شبکه را از ۰/۱۴۵ به ۰/۱۳ کاهش داده است. مورفولوژی پودرهای آسیابکاری شده نشان می دهد در صورت حضور هم زمان ذرات تقویت کننده سرامیکی و بین فلزی، فرآیند آسیابکاری با سرعت بیشتری انجام می پذیرد. در مدت زمان یکسان آسیابکاری (۱۲ ساعت)، در پودرهای حاوی ذرات تقویت کننده اکسید آلومینیوم و آلومیناید نیکل توالی فرآیندهای جوش و شکست سریع تر صورت می گیرد که باعث ریزتر و هم محورتر شدن ذرات پودر آلومینیوم در مقایسه با پودرهای حاوی ذرات تقویت کننده بین فلزی می شود (شکل ۷).



شکل (۸): تصویر میکروسکوپ نوری، (الف): کامپوزیت $\text{Al/5 vol.\%Ni}_3\text{Al}$ و (ب): کامپوزیت $\text{Al/5 vol.\%(Ni}_3\text{Al+Al}_2\text{O}_3)$ تفجوشی شده در دمای 620°C .

آسیابکاری مکانیکی باعث ریز شدن پودرها و کار سختی آنها می شود در نتیجه فرآیند فشردن سرد به راحتی انجام نمی گردد و چگالی خام و بالطبع چگالی نهایی افت می کند. از طرفی عوامل ذکر شده به همراه ریزدانه شدن ریزساختار در اثر فرآیند آسیابکاری موجب افزایش سختی و استحکام فشاری می شوند. کارسختی پودرها و توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه در شرایط آسیابکاری [۱۰] باعث می شود که نمونه های حاوی ذرات تقویت کننده Ni_3Al که آسیابکاری شده اند دارای سختی بسیار بالایی معادل 95 HV هستند.

مشاهده می شود استحکام نهایی آلومینیوم خالص در این شرایط ساخت، در حدود 140 MPa است. با افزودن ذرات تقویت کننده Ni_3Al به آلومینیوم، استحکام فشاری نهایی آن افزایش می یابد. بیان شده است که در کامپوزیت ها تنش اعمالی



شکل (۷): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودرهای کامپوزیتی در بزرگنمایی های مختلف، (الف): کامپوزیت $\text{Al/5 vol.\%Ni}_3\text{Al}$ و (ب): $\text{Al/5 vol.\%(Ni}_3\text{Al+Al}_2\text{O}_3)$.

میکروسکوپی این کامپوزیت ها در شکل (۸) نشان داده شده است. مشاهده می شود که هر دو کامپوزیت دارای توزیع خوبی از ذرات تقویت کننده در زمینه می باشند.

نتایج آزمایش های تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه ها نیز در جدول (۱) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود افزودن ذرات تقویت کننده باعث کاهش چگالی نسبی خام و نهایی و از طرفی افزایش چشمگیر در سختی و استحکام فشاری نمونه ها شده است. از آن جایی که افزودن ذرات تقویت کننده و انجام عملیات آسیابکاری باعث تغییر مورفولوژی پودرها و خصوصیات آنها می شود بالطبع تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی آنها نیز قابل پیش بینی است.

جدول (۱): خواص فیزیکی و مکانیکی آلومینیوم خالص و کامپوزیت‌های پایه آلومینیوم.

خواص نوع ماده	چگالی خام (g/cm ³)	چگالی نهایی (g/cm ³)	سختی (HV30)	استحکام فشاری (MPa)	داکتیلیتی (%)	تافنس (J)
Pure Al	۲/۵۸	۲/۵۶	۴۳	۱۴۰	۱۲/۵	۱۳/۲
Al/5vol.%Ni ₃ Al	۲/۶۵	۲/۶۵	۹۵	۱۶۶	۶/۳	۹/۷۲
Al/5vol.%(Ni ₃ Al + Al ₂ O ₃)	۲/۵۰	۲/۵۸	۸۷	۴۳۲	۷/۸	۳۱/۸۱

۴- نتیجه گیری

انجام این تحقیق به نتایج زیر منجر شد:

۱- در شرایط آزمایش شده می‌توان گفت آسیابکاری به مدت ۱۲ ساعت موجب توزیع بهینه ذرات Ni₃Al در بین ذرات آلومینیوم می‌شود.

۲- زمان طولانی‌تر آسیابکاری (۱۸ ساعت) موجب کارسختی بیشتر و افزایش احتمال اکسیداسیون پودرها در اثر سطح تماس بیشتر پودرهای ریزتر و آلودگی ناشی از دیواره محفظه و گلوله‌ها می‌شود. از طرفی در زمان زیاد آسیابکاری، امکان واکنش ذرات تقویت کننده با آلومینیوم وجود دارد.

۳- در فرآیند آسیابکاری سرعت بالا موجب جوش سرد بهتر و نسبت گلوله به پودر بالا موجب شکست بیشتر می‌شود. در نتیجه با انتخاب حد بالایی پارامترهای مذکور تعادل مناسبی بین شکست و جوش سرد به وجود می‌آید.

۴- ضربات بیشتر در نسبت گلوله به پودر بالاتر باعث افزایش شکست پودرها شده است و اندازه پودرها را ریزتر کرده است. ۵- افزودن ذرات اکسید آلومینیوم با اندازه نانومتری باعث کاهش شدت پیک‌های آلومینیوم و پهن شدن آنها شده است.

۶- مورفولوژی پودرهای آسیابکاری شده نشان می‌دهد در صورت حضور هم‌زمان ذرات تقویت کننده سرامیکی و بین فلزی، فرآیند آسیابکاری با سرعت بیشتری انجام می‌پذیرد. در این پودرها توالی فرآیندهای جوش و شکست سریع‌تر صورت می‌گیرد که باعث ریزتر و هم محورتر شدن ذرات پودر آلومینیوم در مقایسه با پودرهای حاوی ذرات تقویت کننده بین فلزی می‌شود.

۷- افزودن ذرات تقویت کننده باعث کاهش چگالی نسبی خام و

به نمونه بین زمینه و ذرات تقویت کننده تفکیک می‌شود و سهم زیادی از آن به وسیله ذرات تقویت کننده تحمل می‌شود [۱۱]. در نتیجه در کامپوزیت Al/5vol.%Ni₃Al به علت ریز شدن ساختار زمینه و ذرات تقویت کننده و توزیع کاملاً یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه، استحکام افزایش یافته است.

با تغییر ذرات تقویت کننده به اکسید آلومینیوم نانومتری، افزایش شدیدی در استحکام ایجاد می‌شود. فعالیت مکانیزم‌های متفاوت استحکام بخشی به صورت هم‌زمان در حین اعمال نیرو باعث ایجاد بالاترین استحکام برابر ۴۳۲ MPa در کامپوزیت دارای ذرات تقویت کننده نانومتری اکسیدی و میکرومتری بین فلزی می‌شود. در این حالت ذرات بین فلزی وظیفه تحمل بار را دارند و ذرات نانومتری اکسید آلومینیوم، مکانیزم‌های استحکام بخشی به وسیله نابجایی‌ها را فعال می‌کنند.

از طرفی، کار سختی به وجود آمده در پودرها باعث کاهش داکتیلیتی می‌شود. در هنگام استفاده از ذرات تقویت کننده با ابعاد نانومتری، بخاطر ریز بودن ذرات، فاصله بین آن‌ها خیلی کم است و مانع رشد ترک‌ها می‌شود و از اتصال حفرات به یکدیگر جلوگیری می‌کند در نتیجه داکتیلیتی افزایش می‌یابد. از آن جایی که چقرمگی پارامتری است که هم به استحکام و هم به داکتیلیتی ماده بستگی دارد در حالت کلی مشاهده می‌شود که چقرمگی کامپوزیت‌ها در مقایسه با آلومینیوم خالص بیشتر است. فرآیند آسیابکاری چقرمگی کامپوزیت‌ها را کاهش می‌دهد و همچنین کامپوزیت Al/5vol.%(Ni₃Al+Al₂O₃) به علت حضور ذرات نانومتری اکسید آلومینیوم دارای چقرمگی بیشتری نسبت به کامپوزیت Al/5 vol.% Ni₃Al است.

- [7] J. M. Torralba, F. Velasco, C. E. Costa, I. Vergara and D. Caceres, "Mechanical Behaviour of the Interphase Between Matrix and Reinforcement of Al 2014 Matrix Composites Reinforced with $(\text{Ni}_3\text{Al})_p$ ", Composites: Part A, Vol. 33, pp. 427-434, 2002.
- [8] م. عباسی، م. آزادبیه، س.ع. سجادی، "بررسی پارامترهای آسیابکاری بر تولید پودر نانو ساختار Ni_3Al به روش آلیاژسازی مکانیکی"، دومین همایش مشترک متالورژی و ریختگری ایران، دانشگاه آزاد کرج، آبان ۱۳۸۷.
- [9] I. Lucks, P. Lamparter and E. J. Mittemeijer, "An Evaluation of Methods of Diffraction-Line Broadening Analysis Applied to Ball-Milled Molybdenum", Journal of Applied Crystallography, Vol. 37 (2), pp. 300-311, 2004.
- [10] J. B. Fogagnolo, F. Velasco, M. H. Robert and J. M. Torralba, "Effect of Mechanical Alloying on the Morphology, Microstructure and Properties of Aluminium Matrix Composite Powders", Materials Science and Engineering A, Vol. 342, pp. 131-143, 2003.
- [11] Z. Razavi Hesabi, H. R. Hafizpour and A. Simchi, "An Investigation on the Compressibility of Aluminum/Nano-Alumina Composite Powder Prepared by Blending and Mechanical Milling", Materials Science and Engineering A, Vol. 454-455, pp. 89-98, 2007.
- نهایی و از طرفی افزایش چشمگیر در سختی و استحکام فشاری نمونه‌ها شده است.
- ۸- نوع ذرات تقویت کننده در خواص کامپوزیت زمینه آلومینیوم بسیار مؤثر است. بیشترین سختی در کامپوزیت با ۵ درصد ذرات تقویت کننده Ni_3Al معادل HV30 ۹۵ است و بیشترین استحکام فشاری و تافنس در کامپوزیت‌های $\text{Al}/5\text{vol.}\%(\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3)$ به دست آمده است.
- ۵- مراجع**
- [1] Z. Razavi Hesabi, A. Simchi and SM. Seyed Reihani, "Structural Evolution During Mechanical Milling of Nanometric and Micrometric Al_2O_3 Reinforced Al Matrix Composites", Materials Science and Engineering: A, Vol. 428, pp. 159-168, 2006.
- [2] T. G. Durai, D. Karabi and D. Siddhartha, "Synthesis and Characterization of Al Matrix Composites Reinforced by in Situ Alumina Particulates", Materials Science and Engineering A, Vol. 445-446, pp. 100-105, 2007.
- [3] P. Yu, L. C. Zhang, W. Y. Zhang, J. Das, K. B. Kim and J. Eckert, "Interfacial Reaction During the Fabrication of Ni_60Nb_40 Metallic Glass Particles-Reinforced Al Based MMCs", Materials Science and Engineering A, Vol. 444, pp. 206-213, 2007.
- [4] H. Jixiong, "Processing, Microstructure Evolution and Properties of Nanoscale Aluminum Alloys", Thesis in the Department of Chemical and Materials Engineering of the University of Cincinnati, pp. 1-219, 2005.
- [5] Zh. Yang, L. He, J. Chen, H. Cong and H. Ye, "Microstructure and Thermal Stability of an Ultrafine $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ Composite", Shenyang National Laboratory for Materials Science, 2002.
- [6] M. Zdujic, "Mechanochemical Treatment of Inorganic Solids: Solid-Solid Fine Dispersions", Surfactant Sci. Ser., Vol. 130, pp. 435-461, 2006.