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

مریم عباسی[1]، سید عبدالکریم سجادی[2] و مازیار آزادبه[3]

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 تقویت‌کننده در زمینه از مهمترین پارامترهای مورد توجه در تولید کامپوزیت‌ها است. یکی از راهکارها برای رسیدن به‌این منظور استفاده از روش آسیابکاری مکانیکی در متالورژی پودر است. در نتیجه به‌دست آوردن شرایط آسیابکاری بهینه از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در این پژوهش سعی شده‌است تا شرایط بهینه آسیابکاری ذرات تقویت‌کننده Ni_3Al و پودر آلومینیوم جهت ساخت کامپوزیت Al/5vol.%Ni_3Al مورد بررسی قرار گیرد. از طرفی برای بررسی تأثیر نوع ذرات تقویت‌کننده بر خواص کامپوزیت زمینه آلومینیوم از دو نوع تقویت‌کننده اکسیدی و بین فلزی استفاده شده‌است. در نهایت از آن جایی‌که آسیابکاری مکانیکی باعث تغییر مورفولوژی و خواص پودرها می‌شود، تغییر در خواص کامپوزیت‌های تولید شده نیز انتظار می‌رود. مشاهده می‌شود انجام آسیابکاری مکانیکی در شرایط بهینه، باعث کاهش چگالی و افزایش سختی و استحکام نهایی می‌شود و همچنین ذرات تقویت‌کننده اکسیدی در مقایسه با ذرات بین‌فلزی باعث افزایش سختی کمتر ولی افزایش استحکام و داکتیلیتی چشم‌گیری می‌شوند.

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت، آسیابکاری مکانیکی، ذرات تقویت‌کننده، خواص فیزیکی و مکانیکی.

۱- مقدمه

در ساخت کامپوزیتهای زمینه فلزی گستره وسیعی از فلزات و آلیاژها مانند آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای مس، چدن، فولاد، آلیاژهای منیزیم، سوپرآلیاژهای پایه نیکل، آلیاژهای تیتانیوم، آلیاژهای روی و ... کاربرد دارند. استحکام و سختی و سایر خواص مکانیکی آلومینیوم نسبت به‌فلزاتی چون آهن، نیکل و تیتانیوم ضعیف‌تر می‌باشد. لذا از آلومینیوم صرفاً به‌صورت آلیاژی یا به‌عنوان زمینه کامپوزیت و یا ترکیبی از این دو استفاده می‌شود تا از خواص مکانیکی بهتری برخوردار باشد. بر همین اساس کامپوزیتهای زمینه فلزی (MMCs) و به‌خصوص کامپوزیتهای زمینه آلومینیوم (AMC) طی دو دهه گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است [۱ و ۲].

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

تقویت‌کننده باعث افت خواص مکانیکی می‌شود. آسیابکاری با انرژی بالا روشی است که توزیع ذرات بسیار همگنی را ایجاد می‌کند و به‌همین دلیل در سال‌های اخیر برای تولید کامپوزیتهای پایه فلزی گسترش یافته‌است. 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 پرانرژی 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 پیش‌آلیاژی شده را دارا می‌باشد [۳].

با اضافه کردن پودرهای سرامیکی به‌آلومینیوم و انجام آسیابکاری، ذرات سرامیکی در مقیاس نانومتری در زمینه آلومینیوم پخش می‌شوند که باعث کاهش اندازه دانه‌ها و قفل شدن نابجایی‌ها در زمینه آلومینیوم می‌شوند. لذا استحکام، سختی، خواص دمای بالا و سایر خواص مکانیکی آلومینیوم بهبود می‌یابد. این کامپوزیتها در صنایع هوافضا، صنایع نظامی و خودروسازی کاربرد فراوانی دارند [۴، ۵ و ۶].

افزودن ترکیبات بین‌فلزی به‌آلومینیوم نیز به‌علت سختی و قابلیت سازگاری بالای آن‌ها مفید است. از طرفی، مقاومت به‌خوردگی و رفتار سایشی نیز بهبود می‌یابد که تمام این پدیده‌ها مربوط به‌فصل مشترک زمینه و تقویت‌کننده است. از خانواده بین‌فلزی‌ها (ترکیبات آهن، آلومینیوم و نیکل)، Ni_3Al یکی از انواع شناخته‌شده است [۷] که تولید آن به‌روش متالورژی پودر منجر به‌ساخت موادی با استحکام زیاد و قابلیت اطمینان بالای تولید می‌شود.

بر اساس مطالعات تئوری چون مکانیزم استحکام‌بخشی ذرات تقویت‌کننده نانومتری و میکرومتری متفاوت و مجزا از یکدیگر می‌باشد، حدس زده می‌شود در اثر حضور هم‌زمان ذرات اکسیدی نانومتری و بین‌فلزی میکرومتری بهترین خواص حاصل شود. از آن جایی‌که تاکنون این موضوع مورد ارزیابی قرار نگرفته‌است، به‌منظور بررسی صحت این ادعا نیمی از درصد حجمی ذرات تقویت‌کننده کامپوزیت مورد نظر با ذرات اکسید آلومینیوم نانومتری جایگزین شده و تأثیر آن بر ریزساختار کامپوزیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی تأثیر ذرات تقویت‌کننده بین‌فلزی و همچنین حضور هم‌زمان ذرات اکسیدی و بین‌فلزی، کامپوزیتهایی با ترکیب Al/5 vol.%Ni_3Al و Al/5 vol.% ($Ni_3Al + Al_2O_3$) انتخاب شدند.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق برای تولید پودر کامپوزیت Al/5 vol.% Ni_3Al و Al/5 vol.% ($Ni_3Al+Al_2O_3$) از آلومینیوم با خلوص بیش از ۹۹ درصد و اندازه دانه کمتر از ۱۶۰ µm ساخت شرکت Merck آلمان و ذرات تقویت‌کننده اکسید آلومینیوم با ابعاد ۴۳-۲۷ nm و با خلوص ۹۹/۵٪ ساخت شرکت Texas آمریکا استفاده شد. پودر Ni_3Al نیز به‌روش آلیاژسازی مکانیکی از آسیابکاری پودرهای Ni و Al به‌مدت ۱۵ ساعت با استفاده از یک آسیاب ماهواره‌ای پرانرژی تهیه گردید [۸]. برای تولید پودر کامپوزیت Al/5 vol.%Ni_3Al، ۵ درصد حجمی ذرات تقویت‌کننده Ni_3Al و ۹۵ درصد پودر آلومینیوم در شرایط مختلف مخلوط‌سازی، ۱۲ ساعت و ۱۸ ساعت آسیابکاری، با سرعت‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ دور بر دقیقه و نسبت گلوله به‌پودر ۶:۱ و ۱۵:۱ آسیابکاری شدند. همچنین شرایط مخلوط‌سازی کم انرژی به‌عنوان صفر ساعت آسیابکاری منظور گردید. آسیابکاری در محیط آرگون و به‌وسیله گلوله‌های فولاد زنگ نزن انجام شد. همچنین جهت بررسی تأثیر نوع تقویت‌کننده بین‌فلزی یا اکسیدی بر خواص آلومینیوم، ۲/۵ درصد حجمی Ni_3Al و ۲/۵ درصد حجمی نانو اکسید آلومینیوم به‌همراه ۹۵ درصد حجمی آلومینیوم آسیابکاری شدند. برای بررسی تأثیر تقویت‌کننده‌ها بر آلومینیوم، نمونه‌هایی از آلومینیوم خالص نیز تحت شرایط کاملاً مشابه تولید شد. سپس مخلوط پودر آلومینیوم و ذرات تقویت‌کننده با دستگاه پرس تک محوری تحت فشار ۸۰۰ MPa فشرده شد. به‌منظور بررسی تأثیر نوع تقویت‌کننده بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت، نمونه‌های خام در دمای ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد در

کوره مدل SA با خلا تقریبی 5×10^{-4} Torr به‌مدت ۳۰ دقیقه تفجوشی شدند. آنالیز XRD به‌وسیله دیفراکتومتر Bruker:Advance-D8 و با تابش اشعه $Cu(k_\alpha)$ 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 به‌دو 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.

$$\rho = M_1/(M_2-M_3) \qquad (۱)$$

M_1: جرم نمونه وزن شده در هوا

M_2: جرم نمونه آغشته به‌روغن وزن شده در هوا

M_3: 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.

$$\rho = \Sigma\, \rho_i \times x_i \qquad (۲)$$

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

آزمون‌های فشار به‌وسیله دستگاه تست فشار و کشش (مدل Zwick/z250) طبق استاندارد ASTM E9 با نسبت ارتفاع به‌قطر 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.

۳- نتایج و مباحث

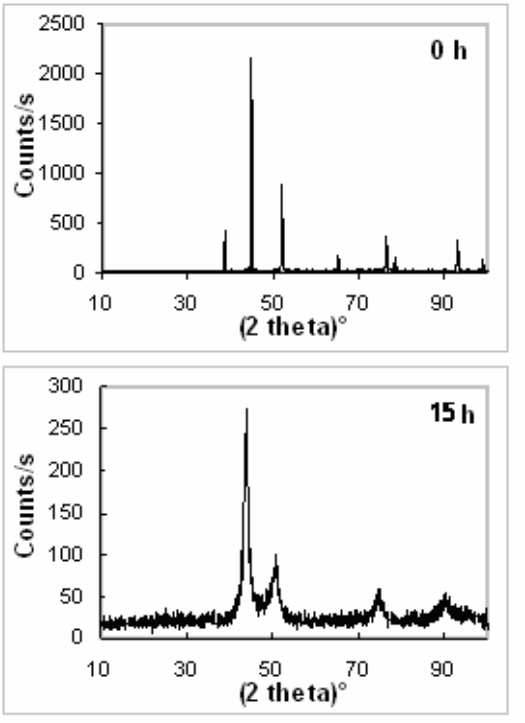
۳-۱- تولید پودر تقویت‌کننده Ni_3Al

همانطورکه در بخش قبل اشاره شد ذرات تقویت‌کننده Ni_3Al با روش آسیابکاری مکانیکی تولید شد. از آن جایی‌که انتخاب صحیح مدت زمان فرآیند آلیاژسازی جهت دستیابی به‌پودری با بهترین مورفولوژی و خواص از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، مشخصات ساختاری پودر Ni_3Al آسیابکاری شده در زمان‌های ۱ تا ۵۵ ساعت در تحقیقات پیشین نویسنده مورد بررسی کامل قرار گرفت [۸]. بنا بر نتایج به‌دست آمده پودر Ni_3Al 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 Ni_3Al تولید شده با ۱۵ ساعت آسیابکاری به‌ترتیب ۴/۸۱ نانومتر و ۰/۰۰۵٪ می‌باشد.

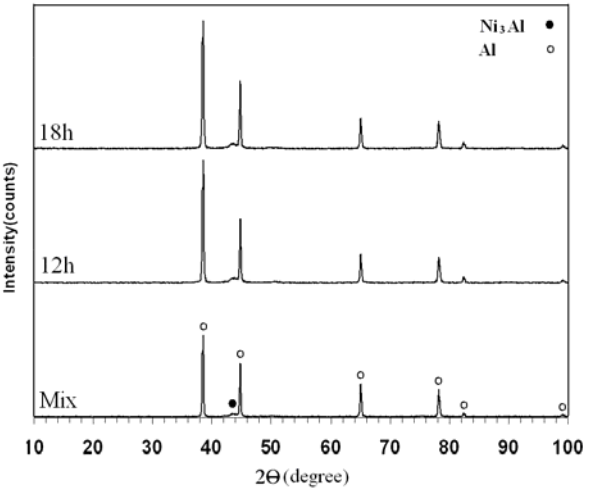
۳-۲- پودر کامپوزیتی $Al/5vol.\%\ Ni_3Al$

جهت مخلوط‌سازی ذرات تقویت‌کننده Ni_3Al و پودرهای آلومینیوم، فرآیند آسیابکاری مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهای اصلی در فرآیند آسیابکاری پودرهای آلومینیوم و ذرات تقویت‌کننده شامل زمان آسیابکاری، سرعت آسیابکاری و نسبت گلوله به‌پودر در فرآیند است که تأثیر هر کدام از این متغیرها به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌است.

شکل (۲) الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به‌پودرهای کامپوزیتی مخلوط شده و آسیابکاری شده در زمان‌های ۱۲ و ۱۸ ساعت را نشان می‌دهد. همانطورکه 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 Ni_3Al کاهش می‌یابد و کرنش‌های درون شبکه‌ای افزایش



شکل (۱): الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودرهای آلومینیوم و نیکل در زمان‌های متفاوت آلیاژسازی به‌منظور تولید ذرات تقویت‌کننده Ni_3Al.

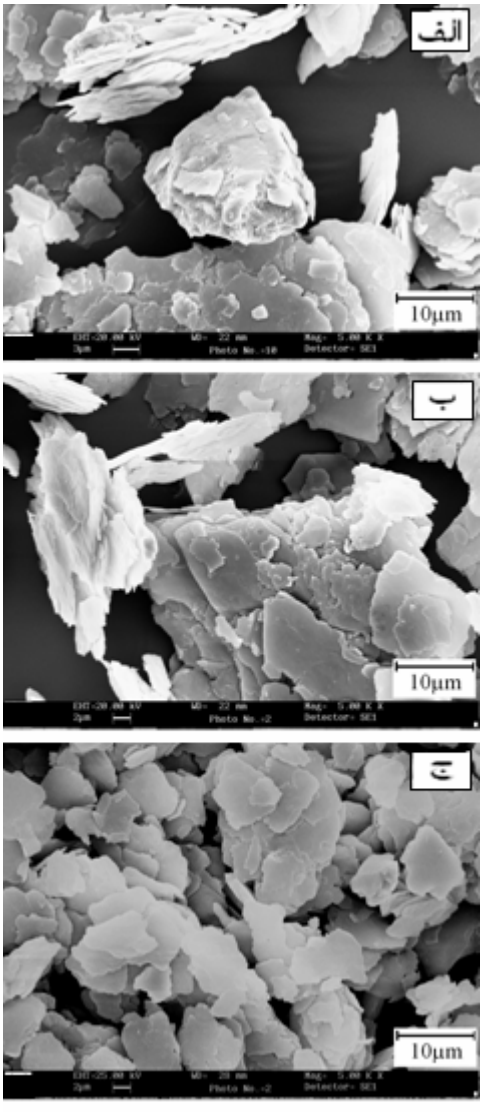


شکل (۲): نمودار پراش پرتو ایکس پودر کامپوزیتی Al/5 vol. % Ni3Al تهیه شده به‌روش آسیابکاری، در زمان‌های متفاوت.

جزئی را نشان می‌دهد.

بررسی مورفولوژی پودرها (شکل ۳) نشان می‌دهد در شرایط مخلوط کردن پودر آلومینیوم و پودر تقویت‌کننده Ni_3Al، ذرات تقویت‌کننده به‌خوبی در پودر آلومینیوم توزیع نشده‌است. به‌طوری‌که دیده می‌شود ذرات تقویت‌کننده به‌صورت آگلومره با اندازه بزرگ در حدود ۵۰ میکرون به‌صورت غیرهمگن در بین ذرات پودر آلومینیوم قرار گرفته‌اند. در حالی که با آسیابکاری این پودرها، در اثر برخورد گلوله‌های آسیاب با ذرات پودر آلومینیوم و تقویت‌کننده، توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده در زمینه ایجاد می‌شود. پودرهای آلومینیوم چون نرم هستند دچار تغییر فرم پلاستیک می‌شوند و ضخامت ذرات پولکی کاهش می‌یابد ولی ذرات تقویت‌کننده Ni_3Al چون نسبت به‌آلومینیوم تردتر هستند در اثر آسیابکاری می‌شکنند.

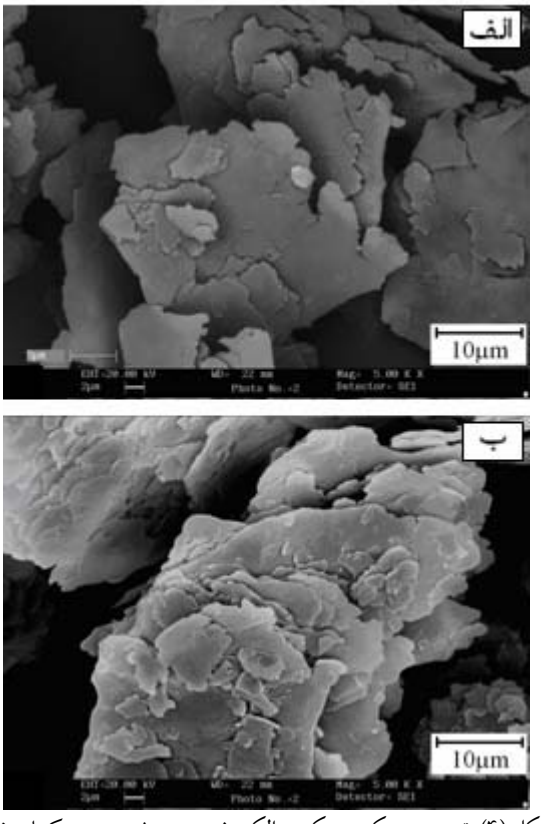
جهت بررسی تأثیر سرعت آسیابکاری، از زمان آسیابکاری ۱۸ ساعت و نسبت گلوله به‌پودر ۶:۱ استفاده شده‌است تا تفاوت در نتایج به‌دست آمده محسوس و قابل مقایسه و بررسی باشد. نتایج به‌دست آمده در شکل (۴) نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود در سرعت ۲۰۰ rpm اندازه ورقه‌های پودر آلومینیوم به‌نسبت درشت است و فرآیند جوش سرد بین ذرات کامل نشده‌است. به‌طوری‌که ذرات پودر به‌صورت مجزا از همدیگر قرار گرفته‌اند. این باعث می‌شود تا ذرات تقویت‌کننده توزیع یکنواختی نداشته باشند. در نتیجه فرآیند مخلوط‌سازی به‌صورت مطلوب صورت نمی‌گیرد. با افزایش سرعت آسیاب چون انرژی وارد شده به‌سیستم در واحد زمان به‌صورت محسوسی افزایش می‌یابد، خرد شدن ذرات پودر و جوش سرد بین آنها به‌شدت افزایش می‌یابد. در سرعت آسیابکاری ۳۰۰ rpm، پودرهای پولکی ریز آلومینیوم و ذرات تقویت‌کننده که در بین این ورقه‌ها قرار گرفته‌اند ذرات پودر کامپوزیتی را تشکیل می‌دهند. مورفولوژی پودرهای حاصل ریزتر و همگن‌تر می‌شود و ذرات تقویت‌کننده به‌صورت کاملاً یکنواخت در زمینه توزیع می‌شوند. به‌بیان دیگر در سرعت ۳۰۰ rpm ساختار پودری با توزیع ذرات تقویت‌کننده یکنواخت حاصل می‌شود و نیازی به‌سرعت آسیابکاری بالاتر وجود ندارد. از طرفی انتظار می‌رود که افزایش سرعت آسیابکاری بیشتر از ۳۰۰ rpm منجر به‌واکنش ذرات



شکل (۳): مورفولوژی پودر کامپوزیت Al/5 vol. % Ni_3Al، (الف): پودر مخلوط شده، (ب): ۱۲ ساعت آسیابکاری شده و (ج): ۱۸ ساعت آسیابکاری شده در روش آسیابکاری سرعت rpm ۳۰۰ و نسبت گلوله به‌پودر ۱۵:۱ بوده‌است.

تقویت‌کننده و زمینه شود که خواص کامپوزیت را تغییر خواهد داد.

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

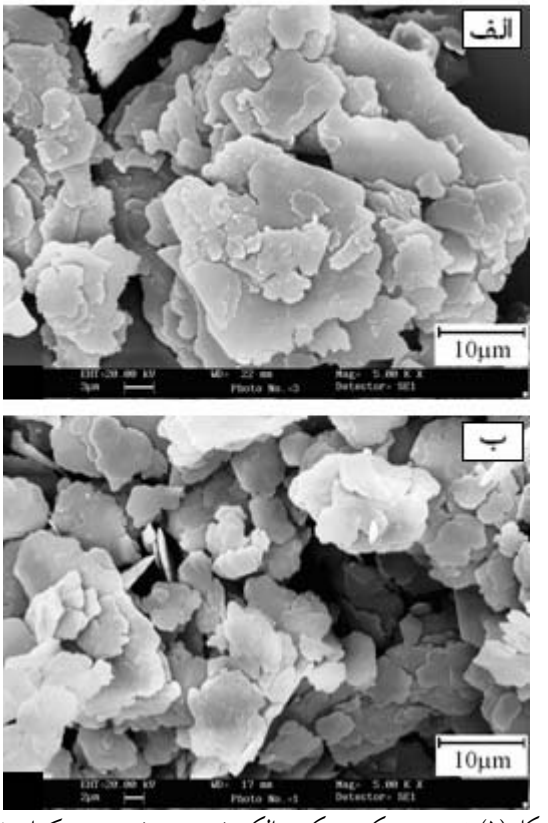


شکل (۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر کامپوزیتی Al/5 vol. % Ni_3Al تولید شده با سرعت‌های متفاوت، (الف): rpm ۲۰۰ و (ب): rpm ۳۰۰.

بیشتر توسط گلوله‌ها به‌پودر در واحد زمان می‌شود. همانطورکه در شکل (۵) مشاهده می‌شود ضربات بیشتر در نسبت گلوله به‌پودر بالاتر باعث افزایش شکست پودرها شده‌است و اندازه پودرها را ریزتر کرده‌است. مورفولوژی پودرها همچنان به‌صورت پولکی است.

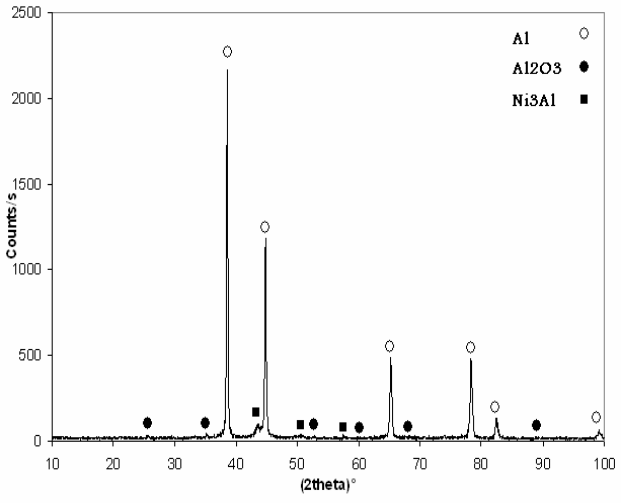
۳-۳- پودر کامپوزیتی Al/5 vol. %($Ni_3Al + Al_2O_3$)

به‌منظور بررسی تأثیر نوع و اندازه ذرات تقویت‌کننده بر فرآیند آسیابکاری و تولید کامپوزیت آلومینیوم و مقایسه آن با ذرات تقویت‌کننده بین‌فلزی از پودر اکسید آلومینیوم با اندازه nm ۴۳-۲۷ استفاده شده‌است. در شکل (۶) پراش پرتو ایکس پودر کامپوزیتی Al/5 vol. % ($Ni_3Al + Al_2O_3$) آسیابکاری شده تحت شرایط بهینه (۱۲ ساعت آسیابکاری با سرعت ۳۰۰ و نسبت گلوله به‌پودر ۱۵:۱) نشان داده شده‌است. دیده می‌شود که



شکل (۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر کامپوزیتی Al/5 vol. % Ni3Al تهیه شده به‌روش آسیابکاری با نسبت گلوله به‌پودر متفاوت در بزرگنمایی‌های مختلف، (الف): ۶:۱ و (ب): ۱۵:۱.

چون ذرات اکسید آلومینیوم استفاده شده نانومتری بوده‌اند شدت پیک‌های مربوط به‌آن کم است. حضور ذرات اکسید آلومینیوم همچنین باعث کاهش شدت پیک‌های آلومینیوم و پهن شدن آنها شده‌است و اندازه دانه آلومینیوم را از ۶۸ به ۵۱ نانومتر و میزان کرنش‌های شبکه را از ۰/۱۴۵ به ۰/۱۳٪ کاهش داده‌است. مورفولوژی پودرهای آسیابکاری شده نشان می‌دهد در صورت حضور هم‌زمان ذرات تقویت‌کننده سرامیکی و بین‌فلزی، فرآیند آسیابکاری با سرعت بیشتری انجام می‌پذیرد. در مدت زمان یکسان آسیابکاری (۱۲ ساعت)، در پودرهای حاوی ذرات تقویت‌کننده اکسید آلومینیوم و آلومیناید نیکل توالی فرآیندهای جوش و شکست سریع‌تر صورت می‌گیرد که باعث ریزتر و هم محورتر شدن ذرات پودر آلومینیوم در مقایسه با پودرهای حاوی ذرات تقویت‌کننده بین‌فلزی می‌شود (شکل ۷).

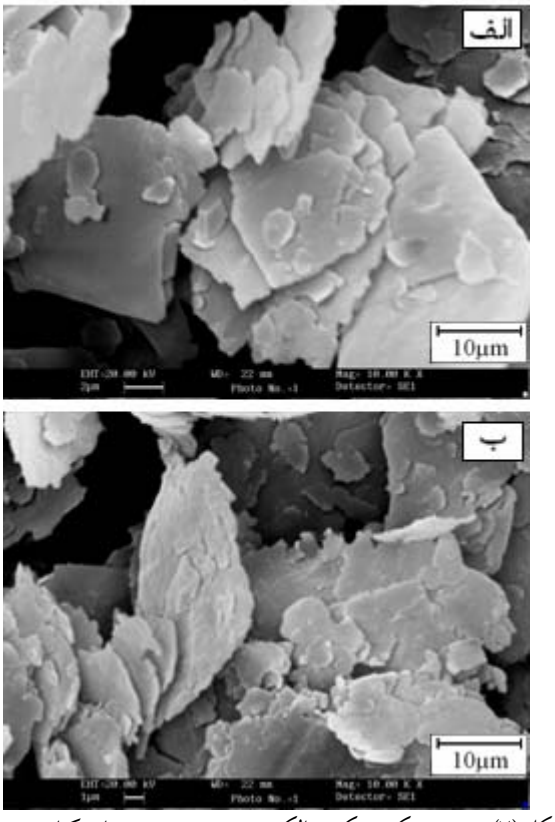


شکل (۶): پراش پرتو ایکس مخلوط پودر کامپوزیتی Al/5 vol. % ($Ni_3Al+Al_2O_3$) تهیه شده به‌روش آسیابکاری، مدت ۱۲ ساعت با سرعت ۳۰۰ و نسبت گلوله به‌پودر ۱۵:۱.

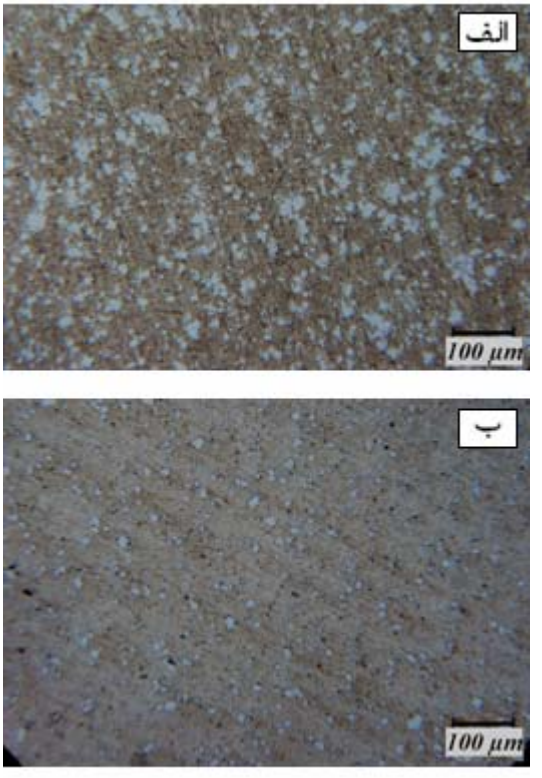
در حین آسیابکاری و آلیاژسازی مکانیکی هنگامی که تغییر فرم به‌حد بحرانی برسد جوش سرد اتفاق می‌افتد. در اثر وجود ذرات تقویت‌کننده سرامیکی که نسبت به‌ذرات بین‌فلزی از سختی بیشتری برخوردارند، در حین جوش خوردن تغییر فرم موضعی پودر زمینهٔ اطراف ذرات تقویت‌کننده افزایش می‌یابد که فرآیند جوش خوردن ذرات را بهبود می‌بخشد. از طرفی تغییر فرم موضعی شدید و به‌دنبال آن سخت شدن بیشتر، منجر به‌تسهیل در فرآیند شکست می‌شود. به‌همین علت در حضور ذرات تقویت‌کنندهٔ سخت، فرآیند آلیاژسازی مکانیکی به‌زمان کمتری نیاز دارد. دلیل دیگری که می‌توان برای کوتاه شدن فرآیند آلیاژسازی در حضور ذرات تقویت‌کننده سرامیکی بیان کرد این است که ذرات ترد تقویت‌کننده در فرآیند به‌عنوان گلوله‌های آسیاب کوچک عمل می‌کنند که انرژی سیستم را بهبود می‌دهد و در نتیجه زمان لازم برای رسیدن به‌حالت پایدار کاهش می‌یابد.

۳-٤- خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیتها

پودرهای کامپوزیتی Al/Ni_3Al و $Al/(Ni_3Al+Al_2O_3)$ آسیابکاری شده تحت شرایط بهینه، با فشار MPa ۸۰۰ فشرده و در دمای ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد تفجوشی شدند. تصاویر



شکل (۷): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودرهای کامپوزیتی در بزرگنمایی‌های مختلف، (الف): کامپوزیت Ni_3Al% .vol 5/Al و (ب): $(Ni_3Al+Al_2O_3)$ % .vol 5/Al.



شکل (۸): تصویر میکروسکوپ نوری، (الف): کامپوزیت Ni_3Al%.vol 5/Al و (ب): کامپوزیت $(Ni_3Al+Al_2O_3)$%.vol 5/Al تفجوشی شده در دمای ۶۲۰°C.

میکروسکوپی این کامپوزیت‌ها در شکل (۸) نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که هر دو کامپوزیت دارای توزیع خوبی از ذرات تقویت‌کننده در زمینه می‌باشند.

نتایج آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها نیز در جدول (۱) آورده شده‌است. همانطورکه مشاهده می‌شود افزودن ذرات تقویت‌کننده باعث کاهش چگالی نسبی خام و نهایی و از طرفی افزایش چشمگیر در سختی و استحکام فشاری نمونه‌ها شده‌است. از آن جایی‌که افزودن ذرات تقویت‌کننده و انجام عملیات آسیابکاری باعث تغییر مورفولوژی پودرها و خصوصیات آنها می‌شود بالطبع تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی آنها نیز قابل پیش‌بینی است.

آسیابکاری مکانیکی باعث ریز شدن پودرها و کار سختی آنها می‌شود در نتیجه فرآیند فشردن سرد به‌راحتی انجام نمی‌گردد و چگالی خام و بالطبع چگالی نهایی افت می‌کند. از طرفی عوامل ذکر شده به‌همراه ریزدانه شدن ریزساختار در اثر فرآیند آسیابکاری موجب افزایش سختی و استحکام فشاری می‌شوند. کارسختی پودرها و توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده در زمینه در شرایط آسیابکاری [۱۰] باعث می‌شود که نمونه‌های حاوی ذرات تقویت‌کننده Ni_3Al که آسیابکاری شده‌اند دارای سختی بسیار بالایی معادل HV ۹۵ هستند.

مشاهده می‌شود استحکام نهایی آلومینیوم خالص در این شرایط ساخت، در حدود MPa ۱۴۰ است. با افزودن ذرات تقویت‌کننده Ni_3Al به‌آلومینیوم، استحکام فشاری نهایی آن افزایش می‌یابد. بیان شده‌است که در کامپوزیت‌ها تنش اعمالی

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_3Al	۲/۶۵	۲/۶۵	۹۵	۱۶۶	۶/۳	۹/۷۲
Al/5vol.%(Ni_3Al + Al_2O_3)	۲/۵۰	۲/۵۸	۸۷	۴۳۲	۷/۸	۳۱/۸۱

به‌نمونه بین زمینه و ذرات تقویت‌کننده تفکیک می‌شود و سهم زیادی از آن به‌وسیله ذرات تقویت‌کننده تحمل می‌شود [۱۱]. در نتیجه در کامپوزیت Al/5vol.%Ni_3Al به‌علت ریز شدن ساختار زمینه و ذرات تقویت‌کننده و توزیع کاملاً یکنواخت ذرات تقویت‌کننده در زمینه، استحکام افزایش یافته‌است.

با تغییر ذرات تقویت‌کننده به‌اکسید آلومینیوم نانومتری، افزایش شدیدی در استحکام ایجاد می‌شود. فعالیت مکانیزم‌های متفاوت استحکام‌بخشی به‌صورت همزمان در حین اعمال نیرو باعث ایجاد بالاترین استحکام برابر MPa ۴۳۲ در کامپوزیت دارای ذرات تقویت‌کنندهٔ نانومتری اکسیدی و میکرومتری بین‌فلزی می‌شود. در این حالت ذرات بین‌فلزی وظیفه تحمل بار را دارند و ذرات نانومتری اکسید آلومینیوم، مکانیزم‌های استحکام‌بخشی به‌وسیله نابجایی‌ها را فعال می‌کنند.

از طرفی، کار سختی به‌وجود آمده در پودرها باعث کاهش داکتیلیتی می‌شود. در هنگام استفاده از ذرات تقویت‌کننده با ابعاد نانومتری، بخاطر ریز بودن ذرات، فاصله بین آن‌ها خیلی کم است و مانع رشد ترک‌ها می‌شود و از اتصال حفرات به‌یکدیگر جلوگیری می‌کند در نتیجه داکتیلیتی افزایش می‌یابد. از آن جایی‌که چقرمگی پارامتری است که هم به‌استحکام و هم به‌داکتیلیتی 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.%(Ni_3Al+Al_2O_3) به‌علت حضور ذرات نانومتری اکسید آلومینیوم دارای چقرمگی بیشتری نسبت به‌کامپوزیت Al/5 vol.% Ni_3Al است.

٤- نتیجه‌گیری

انجام این تحقیق به‌نتایج زیر منجر شد:

۱- در شرایط آزمایش شده می‌توان گفت آسیابکاری به‌مدت ۱۲ ساعت موجب توزیع بهینه ذرات Ni_3Al 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 تقویت‌کننده با آلومینیوم وجود دارد.

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

۴- ضربات بیشتر در نسبت گلوله به‌پودر بالاتر باعث افزایش شکست پودرها شده‌است و اندازه پودرها را ریزتر کرده‌است.

۵- افزودن ذرات اکسید آلومینیوم با اندازه نانومتری باعث کاهش شدت پیک‌های آلومینیوم و پهن شدن آنها شده‌است.

۶- مورفولوژی پودرهای آسیابکاری شده نشان می‌دهد در صورت حضور هم‌زمان ذرات تقویت‌کننده سرامیکی و بین‌فلزی، 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 تقویت‌کننده بین‌فلزی می‌شود.

۷- افزودن ذرات تقویت‌کننده باعث کاهش چگالی نسبی خام و

نهایی و از طرفی افزایش چشمگیر در سختی و استحکام فشاری نمونه‌ها شده‌است.

۸- نوع ذرات تقویت‌کننده در خواص کامپوزیت زمینه آلومینیوم بسیار مؤثر است. بیشترین سختی در کامپوزیت با ۵ درصد ذرات تقویت‌کننده Ni_3Al معادل HV30 ۹۵ است و بیشترین استحکام فشاری و تافنس در کامپوزیت‌های $Al/5vol.\%(Ni_3Al + Al_2O_3)$ به‌دست آمده‌است.

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 Ni60Nb40 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 Al/Al_2O_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.

[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 $(Ni_3Al)_p$", Composites: Part A, Vol. 33, pp. 427-434, 2002.

[۸] م. عباسی، م. آزادبه، س.ع. سجادی، "بررسی پارامترهای آسیاکاری بر تولید پودر نانو ساختار Ni_3Al به‌روش 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.