

ساخت ترکیب بین فلزی Ni₃Al در شرایط مختلف آلیاژسازی مکانیکی*محمدحسین عنایتی^(۱) علی سعیدی^(۲) زهره صادقیان^(۳)

چکیده مخلوط پودرهای نیکل و آلومینیم با ترکیب Ni₇₅Al₂₅ در یک آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای تحت شرایط مختلف آلیاژسازی مکانیکی شدند و تغییرات ایجاد شده در ساختار ذرات پودر بوسیله پراش پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی ارزیابی گردید. با آلیاژسازی مکانیکی به مدت حدود ۱۰ ساعت محلول جامد آلومینیم در نیکل تشکیل گردید. با افزایش زمان آسیاب کردن به حدود ۲۰ ساعت این ساختار به ترکیب بین فلزی Ni₃Al با ساختار نانو کریستال تبدیل گردید. کاهش نسبت وزنی گلوله‌ها به پودر و یا کاهش سرعت گردش آسیاب زمان تشکیل فاز Ni₃Al را به مقدار زیادی به تأخیر انداخت. اما کاهش اندازه گلوله‌ها (در صورتی که وزن کل آنها ثابت نگه داشته شود) تأثیر چندانی بر فرآیند آلیاژسازی مکانیکی نداشت.

واژه‌های کلیدی آلیاژسازی مکانیکی، ترکیبات بین فلزی، آلومینیدهای نیکل، Ni₃Al.

Synthesis of Ni₃Al Intermetallic Compound Under Different Mechanical Alloying Conditions

M. H. Enayati

A. Saidi

Z. Sadeghian

Abstract Ni and Al elemental powder mixture with composition Ni₇₅Al₂₅ were mechanically alloyed in a planetary ball mill under different conditions. The structural changes of powder particles were studied by x-ray diffractometry and scanning electron microscopy. Mechanical alloying for $\approx 10h$ resulted in a solid solution of Al in Ni which transformed to Ni₃Al intermetallic compound with nanocrystalline structure after $\approx 20h$ of milling time. Decreasing ball-to-powder weight ratio or rotation speed of mill, drastically retarded the formation of Ni₃Al phase. However, decreasing size of balls, while the balls-to-powder weight ratio remained constant, did not change mechanical alloying process significantly.

Key Words Mechanical Alloying, Intermetallic Compounds, Nickel Aluminides, Ni₃Al.

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۰/۱۰/۲ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۱/۵/۲۶ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استادیار، دانشکده مهندسی، مواد دانشگاه صنعتی اصفهان

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

مقدمه

مخلوط پودر عناصر اولیه در آسیاب گلوله‌ای (یا میله‌ای) به مدت زمان مشخصی آسیاب می‌شود. عواملی مانند نسبت وزن گلوله‌ها به وزن پودر مواد اولیه، دمای محفظه آسیاب، سرعت و مکانیزم حرکت محفظه آسیاب، و اندازه و جنس گلوله‌ها فرآیند آلیاژسازی مکانیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهند که نهایتاً بر روی نوع و ساختار محصول نهایی تأثیر می‌گذارند [7]. عدم نیاز به دماهای بالا، تجهیزات ساده و انجام عملیات تولید در طی یک مرحله، از خصوصیات منحصر به فرد روش آلیاژسازی مکانیکی می‌باشد که می‌تواند تولید آلومینایدهای نیکل با این روش را از روشهای تولید متداول مقرون به صرفه‌تر سازد.

هدف از پروژه حاضر بررسی تولید ترکیب بین فلزی Ni_3Al تحت شرایط مختلف آلیاژسازی مکانیکی بود. به این منظور تأثیر پارامترهایی مانند سرعت گردش آسیاب، قطر گلوله‌های آن و نسبت وزنی گلوله‌ها به مخلوط پودر مواد اولیه در روند تولید Ni_3Al مطالعه گردید.

روش تحقیق

پودرنیکل با خلوص ۹۹/۹٪ و اندازه ذرات بین ۲۸۰-۸۰ میکرون و پودر آلومینیم با خلوص ۹۹/۹٪ و اندازه ذرات بین ۲۶۰-۱۸۰ میکرون به عنوان مواد اولیه انتخاب شدند. از این مواد مخلوطی حاوی ۷۵ درصد اتمی نیکل و ۲۵ درصد اتمی آلومینیم ($Ni_{75}Al_{25}$) با وزن کل ۲۰ گرم تهیه شد و مورد عملیات آلیاژسازی مکانیکی قرار گرفت. آلیاژسازی مکانیکی به کمک یک دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای انجام شد. در این نوع آسیاب محفظه بر روی یک صفحه چرخان قرار دارد و با سرعتی برابر با ۱/۷ برابر سرعت صفحه در خلاف جهت چرخش صفحه می‌چرخد. جنس محفظه آسیاب و گلوله‌ها از نوع فولاد پر کرم بود. به منظور جلوگیری از اکسیداسیون ذرات پودر مواد اولیه عملیات آلیاژسازی مکانیکی تحت اتمسفر گاز آرگن انجام گردید. بدین

آلومینایدهای نیکل نظیر Ni_3Al و $NiAl$ از جمله مواد پیشرفته‌ای هستند که از خواص مهندسی منحصر بفردی نظیر وزن مخصوص پایین، مقاومت سایشی زیاد، استحکام گرم بالا، ضریب اصطکاک کم، هدایت حرارتی بالا و مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون مناسب در دمای بالا برخوردارند [1,2]. بعلاوه این مواد اغلب نقطه ذوب بالاتری نسبت به سوپر آلیاژها دارند و همچنین به دلیل داشتن پیوندهای فلزی چقرمگی بیشتری نسبت به سرامیکها بروز می‌دهند. از این رو در سالهای اخیر بر روی روشهای تولید، خواص و کاربردهای این‌گونه ترکیبات بین فلزی تحقیقات وسیعی انجام گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که آلومینایدهای نیکل برای ساخت قطعات مهندسی، پوشش دادن اجزاء و نیز به‌عنوان ذرات تقویت‌کننده در مواد مرکب برای کاربرد در صنایع هوایی، فضایی و خودرو مواد بسیار مناسبی می‌باشند [1,2]. مهمترین محدودیت برای استفاده از این مواد چقرمگی پایین و شکل‌پذیری کم آنها بویژه در دمای محیط است. برای غلبه بر این مشکلات راه‌حلهای گوناگونی مانند کنترل ریز ساختار، کاهش اندازه دانه‌ها و اصلاح ترکیب شیمیایی پیشنهاد گردیده است [3,4]. آلومینایدهای نیکل با روشهای مختلف مانند ذوب و ریخته‌گری، متالورژی پودر، سنتز احتراقی و رخنه‌دادن (Infiltration) قابل تولید می‌باشند [3,5]. این روشهای تولید غالباً با مشکلات متعددی همراه هستند. برای مثال روش ذوب و ریخته‌گری با جدایش آلومینیم و ایجاد ترکهای ریز در محصول نهایی همراه می‌باشد. بعلاوه اندازه دانه‌های محصول در این روش بسیار بزرگ می‌باشد. به همین دلیل غالباً انجام عملیات ثانویه برای دستیابی به ریزساختاری مطلوب ضروری می‌باشد. در چند سال اخیر فرآیند آلیاژسازی مکانیکی (Mechanical Alloying) نیز برای تولید این مواد مورد توجه قرار گرفته است [6]. در روش آلیاژسازی مکانیکی

XRD مربوط به نمونه قبل از عملیات آلیاژسازی مکانیکی تمامی پیکهای مورد انتظار مربوط به نیکل و آلومینیم خالص را نشان می‌دهد. با انجام عملیات آلیاژسازی مکانیکی پهنای پیکهای نیکل و آلومینیم بطور مداوم افزایش می‌یابد. افزایش پهنای پیکهای نیکل و آلومینیم در اثر تغییر شکل پلاستیکی شدید ذرات پودر می‌باشد که افزایش دانسیته نقص‌های بلوری بخصوص نابجایی‌ها را در پی دارد. این پدیده خود باعث افزایش کرنشهای الاستیک و همچنین ریزشاندازه دانه‌های نیکل و آلومینیم می‌گردد که هر دو منجر به افزایش پهنای پیکهای نیکل و آلومینیم می‌شود [9,10].

همان‌طور که از شکل (۱) پیداست پس از ۱۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی پیکهای نیکل به مقدار اندکی به زوایای کمتر جابجا شده‌اند که نشان دهنده نفوذ آلومینیوم در نیکل و تشکیل محلول جامد آلومینیوم در نیکل می‌باشد. به دلیل بزرگتر بودن اندازه اتمی آلومینیم نسبت به اندازه اتمی نیکل، نفوذ و قرارگرفتن اتمهای آلومینیم در شبکه نیکل باعث افزایش پارامتر شبکه و جابجایی پیکهای نیکل به سمت زوایای کمتر می‌گردد. نفوذ تدریجی آلومینیم در نیکل باعث می‌شود که پس از ۱۵ ساعت آلیاژسازی مکانیکی پیکهای آلومینیم در الگوی XRD مشاهده نشوند. نفوذ عناصر در حین فرآیند آلیاژسازی مکانیکی به دلیل افزایش شدید نقص‌های بلوری، کاهش اندازه دانه‌ها و همچنین افزایش آنی و موضعی دمای ذرات پودر در خلال برخورد گلوله‌ها کاملاً امکانپذیر می‌باشد. [11]

در الگوی XRD پس از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی، پیکهای جدیدی در مجاورت پیکهای نیکل ولی در زوایای کمتر مشاهده می‌شوند.

برای این زمان پیکهای جدید با پیکهای نیکل به مقدار زیادی تداخل دارند اما با افزایش زمان آلیاژسازی مکانیکی به ۴۰ ساعت، پیکهای نیکل کاملاً حذف می‌شوند به طوری که تنها پیکهای جدید

منظور گاز آرگن توسط شیرهایی که روی در محفظه آسیاب تعبیه شده بودند، به محفظه وارد می‌گردید. عملیات آلیاژسازی مکانیکی در دمای محیط صورت گرفت اگرچه در حین فرآیند افزایش ناچیزی ($10-15^{\circ}\text{C}$) در دمای محفظه آسیاب مشاهده گردید. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر فرآیند تشکیل ترکیب بین فلزی Ni_3Al آلیاژسازی مکانیکی تحت چهار شرایط مختلف انجام شد. این شرطها در جدول (۱) خلاصه شده‌اند. برای ارزیابی تغییرات ایجاد شده در ساختار داخلی ذرات پودر و نحوه تشکیل ترکیب بین فلزی Ni_3Al در فواصل زمانی معین از پودر داخل محفظه نمونه برداری شد و نمونه‌ها توسط پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مطالعه شدند. آزمایش‌های XRD در دستگاه Philips مدل X'PERT-MPD تحت ولتاژ 40KV و شدت جریان 30mA با استفاده از اشعه تک‌رنگ $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) و با اندازه گام 0.03° درجه انجام شد. اندازه دانه‌ای محصول نهایی از روی الگوهای XRD و با کمک رابطه شرر $B = \frac{0.9\lambda}{t \cos \theta}$ تخمین زده شد [8]. در این رابطه B پهنای بلندترین پیک در نیمه ارتفاع آن برحسب رادیان، λ طول موج پرتو ایکس برحسب نانومتر، t قطر دانه‌ها بر حسب نانومتر و θ زاویه تفرق بلندترین پیک می‌باشد. میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده برای بررسی سطح مقطع ذرات پودر از نوع Philips مدل XL30 بود.

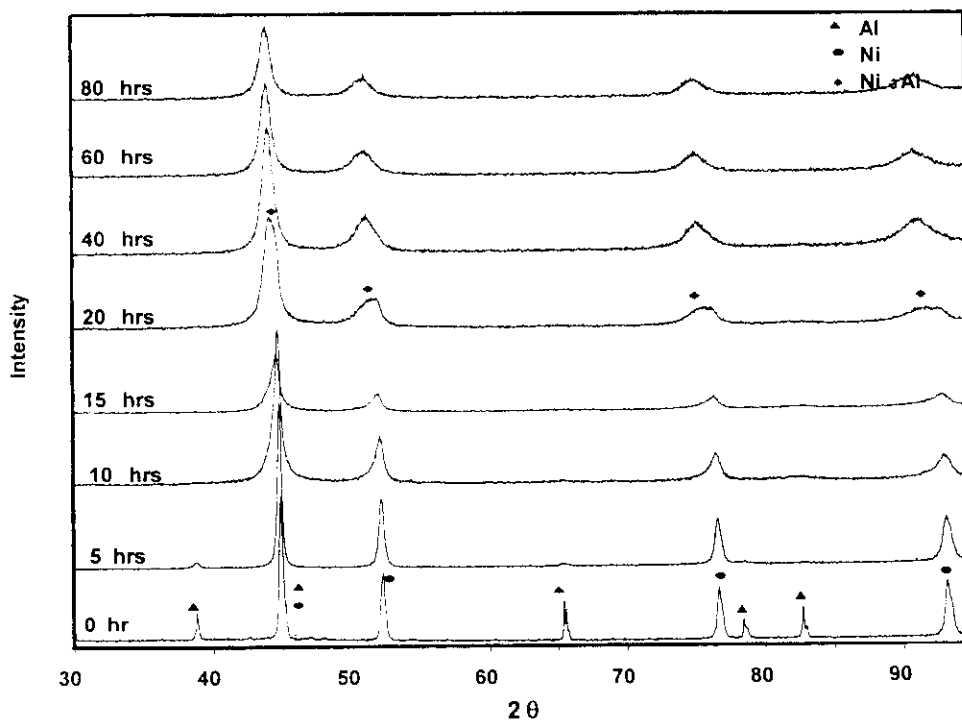
نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نتایج بدست آمده برای نمونه شماره (۱) ارائه می‌گردد و سپس پارامترهای مختلف مورد بحث قرار می‌گیرد.

تغییرات ساختار داخلی ذرات پودر. شکل (۱) الگوهای XRD از ذرات پودر $\text{Ni}_{75}\text{Al}_{25}$ پس از زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی را نشان می‌دهد. الگوی

جدول ۱ شرایط مختلف آلیاژسازی مکانیکی

کد نمونه	سرعت گردش صفحه آسیاب (دور بر دقیقه)	نسبت وزنی گلوله‌ها به پودر	وزن پودر مواد اولیه (گرم)	تعداد گلوله‌ها	قطر گلوله‌ها (سانتیمتر)
۱	۳۹۰	۶/۵	۲۰	۴	۲
۲	۱۹۵	۶/۵	۲۰	۴	۲
۳	۳۹۰	۳/۲۵	۱۰	۴	۲
۴	۳۹۰	۶/۵	۲۰	۳۲	۱



شکل ۱ الگوهای پراش اشعه ایکس از ذرات پودر $Ni_{75}Al_{25}$ پس از زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی (نمونه ۱)

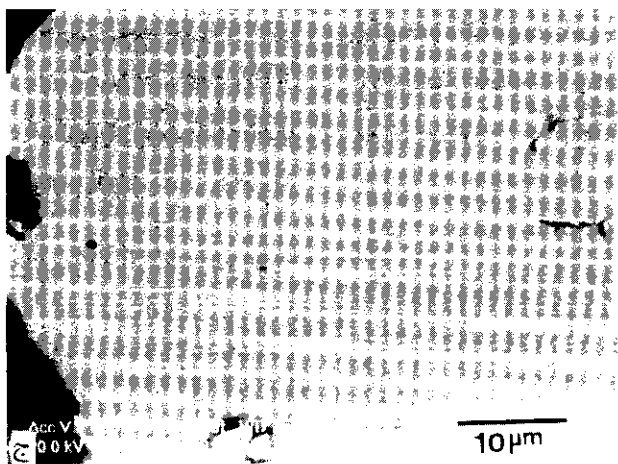
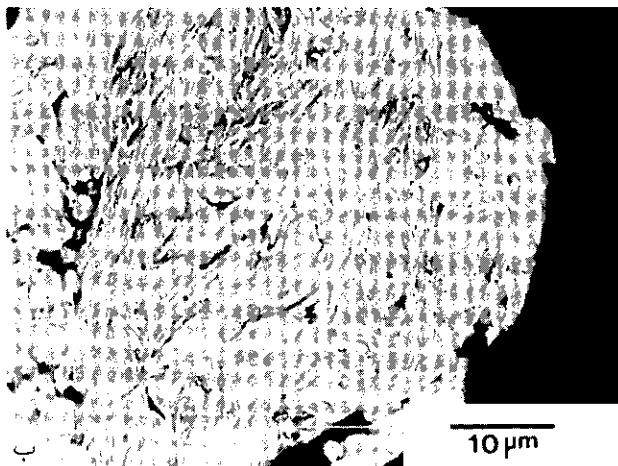
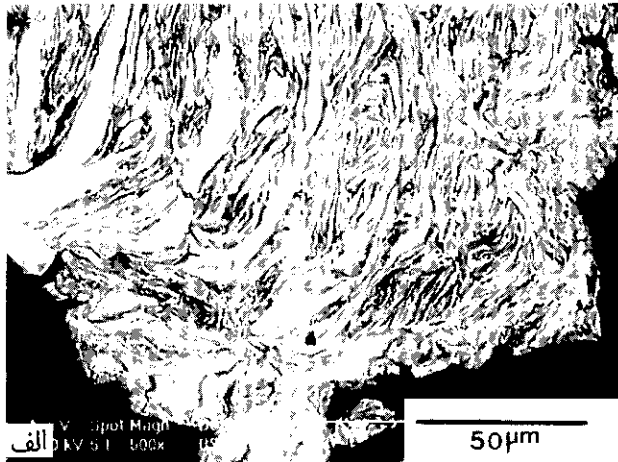
انرژی آزادکل سیستم را کاهش دهند. به این ترتیب آلیاژسازی مکانیکی منجر به ریزشیدن اندازه دانه‌ها تا حد نانومتر می‌گردد [9,10]. ریز شدن دانه‌ها خود منجر به افزایش پهنای پیکهای XRD می‌گردد بطوری که با استفاده از رابطه شرر می‌توان اندازه دانه‌های ماده را از روی پهنای پیکهای XRD آن بدست آورد. در این تحقیق اندازه دانه‌های Ni_3Al پس از ۸۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی با استفاده از رابطه شرر تعیین و در حدود ۱۰ نانومتر تخمین زده شد. این ساختار بسیار ریز باعث می‌شود که عملیات بعدی نظیر فشردن و تفت جوشی ذرات پودر Ni_3Al تسهیل گردد و مهمتر از آن، قطعه نهایی از مشخصات مکانیکی بهتری نظیر چقرمگی و استحکام بیشتر برخوردار باشد.

تغییرات ریز ساختار ذرات پودر. شکل (۲) ساختمان میکروسکوپی سطح مقطع ذرات پودر $Ni_{75}Al_{25}$ پس از زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی را نشان می‌دهد. بعد از گذشت ۵ ساعت از عملیات آلیاژسازی مکانیکی ساختمانی لایه‌ای متشکل از لایه‌های متناوب نیکل و آلومینیم با ضخامت کاملاً غیر یکنواخت تشکیل می‌شود. با افزایش زمان عملیات به ۱۰ ساعت ضخامت لایه‌ها کمتر و یکنواختی ضخامت بیشتر می‌گردد. تشکیل و ریزشیدن ساختمان لایه‌ای در حین آلیاژسازی مکانیکی در اثر اتصال و شکستن مکرر ذرات پودر صورت می‌گیرد. در عملیات آلیاژسازی مکانیکی مجموعه‌ای از ذرات پودر بین دو گلوله به دام افتاده و در اثر ضربه گلوله‌ها تغییر شکل زیادی را متحمل شده و روی هم پهن می‌شوند. در اثر این عمل پوسته اکسیدی سطح ذرات شکسته شده و سطح آزاد فلز زیرین آزاد می‌شود و در نتیجه اتصال فلز-فلز بین ذرات مختلف پودر ایجاد گشته و اصطلاحاً "جوش سرد" بین آنها بوجود می‌آید. با ادامه فرآیند آلیاژسازی

در الگوی XRD مشاهده می‌گردد. با مقایسه شدت نسبی و زاویه تفرق این پیکها با مقادیر مندرج در کارتهای ASTM و فایلهای JCPDS، مشخص شد که پیکهای جدید ناشی از تشکیل ترکیب بین فلزی Ni_3Al می‌باشد. ادامه عملیات آلیاژسازی مکانیکی تغییر عمده‌ای در الگوی XRD ایجاد نمی‌کند و باعث افزایش ناچیزی در پهنای پیکهای Ni_3Al می‌گردد. شایان ذکر است که در مورد برخی از سیستمهای آلیاژی نظیر Ni-Nb و Ni-Zr آلیاژسازی مکانیکی منجر به تشکیل فاز آمورف می‌گردد. اما این پدیده در حین آلیاژسازی مکانیکی ترکیب $Ni_{75}Al_{25}$ مشاهده نگردید زیرا حضور فاز آمورف می‌بایست در الگوهای XRD ایجاد یک پیک پهن (halo) در زوایای پایین بین اولین پیک مربوط به نیکل و آلومینیم کند. لازم به توضیح است که برای اطمینان از تشکیل فاز Ni_3Al نمونه‌هایی از پودر پس از ۴۰، ۶۰ و ۸۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی در دمای $550^{\circ}C$ به مدت ۲۰ دقیقه عملیات حرارتی گردید و تغییری در الگوهای XRD مشاهده نگردید که مؤید این موضوع می‌باشد که ساختار بدست آمده در حین آلیاژسازی مکانیکی، فاز پایدار Ni_3Al می‌باشد و احتمال تشکیل فازهای شبه پایدار دیگری وجود ندارد. به این ترتیب مراحل تشکیل ترکیب بین فلزی Ni_3Al از مخلوط عناصر اولیه نیکل و آلومینیم در حین آلیاژسازی مکانیکی به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد:

Ni_3Al ۲۰ - ۱۵ ساعت (محلول جامد) Ni ۱۰ ساعت $Ni+Al$

همان‌طور که اشاره گردید کار سرد انجام شده بر روی ذرات پودر در حین آلیاژسازی مکانیکی باعث افزایش شدید دانسیته نابجایی می‌گردد که در اثر افزایش درجه حرارت ذرات پودر نابجایی‌ها بتدریج آرایش جدید به صورت مرز دانه بخود می‌گیرند تا

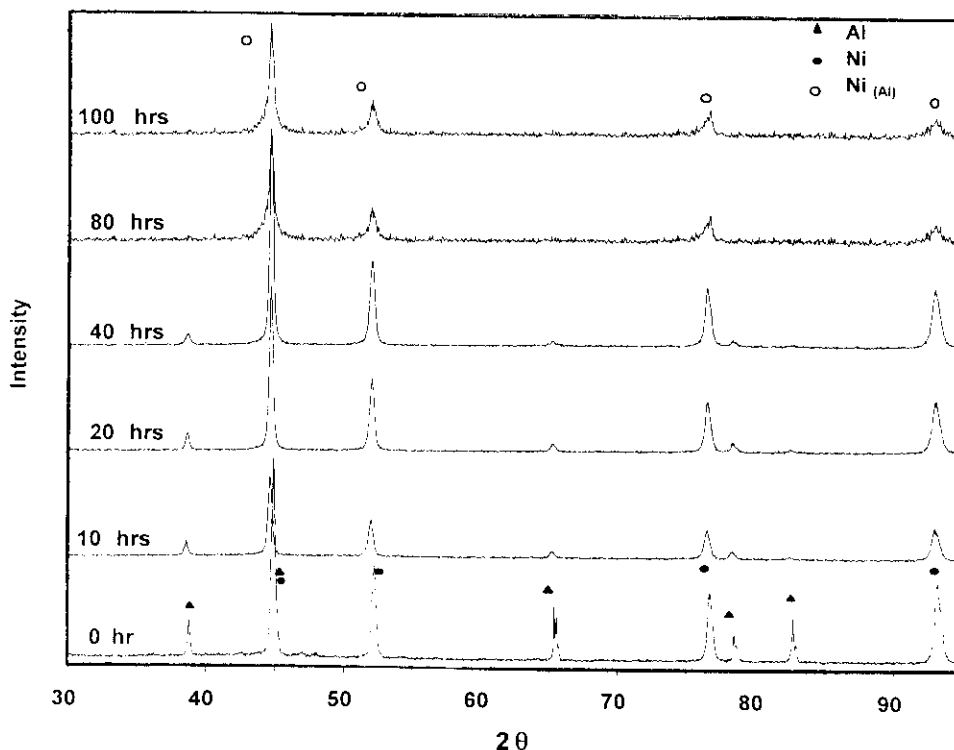


شکل ۲ تصاویر SEM از سطح مقطع ذرات پودر $Ni_{75}Al_{25}$ پس از (الف) ۵ ساعت، (ب) ۱۰ ساعت و (ج) ۵۰ ساعت آلیازسازی مکانیکی

این ساختار در توافق با نتایج XRD شکل (۱) می‌باشد که نشان می‌دهد پس از ۵۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی نیکل و آلومینیم اولیه تماماً مصرف شده و تبدیل به ترکیب بین فلزی Ni₃Al می‌شوند.

تأثیر سرعت گردش آسیاب . به منظور بررسی نقش سرعت گردش آسیاب بر فرآیند تشکیل ترکیب بین فلزی Ni₃Al، آلیاژسازی مکانیکی ترکیب Ni₇₅Al₂₅ با کاهش سرعت گردش آسیاب از ۳۹۰ دور بر دقیقه به نصف این مقدار تکرار گردید (نمونه ۲). شکل (۳) الگوهای XRD از ذرات پودر پس از زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی تحت این شرایط را نشان می‌دهد.

مکانیکی و افزایش میزان کار سرد سختی ذرات پودر افزایش یافته و در اثر ضربه ناشی از گلوله‌ها شکست ذرات پودر نیز اتفاق می‌افتد. تکرار این دو پدیده یعنی اتصال و شکست ذرات پودر در حین آلیاژسازی مکانیکی منجر به تشکیل ساختار لایه‌ای می‌گردد که به مرور زمان لایه‌ها باریک‌تر می‌شوند. در چنین ساختار لایه‌ای ریز، فصل مشترک گسترده‌ای بین نیکل و آلومینیم فراهم می‌باشد و افزون بر این فاصله نفوذ نیز بسیار کوتاه است. این دو عامل واکنش Ni و Al و در نتیجه تشکیل فاز Ni₃Al را تسهیل می‌سازد. در تصویر SEM از ذرات پودر پس از ۵۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی هیچگونه ساختار لایه‌ای مشاهده نمی‌شود.

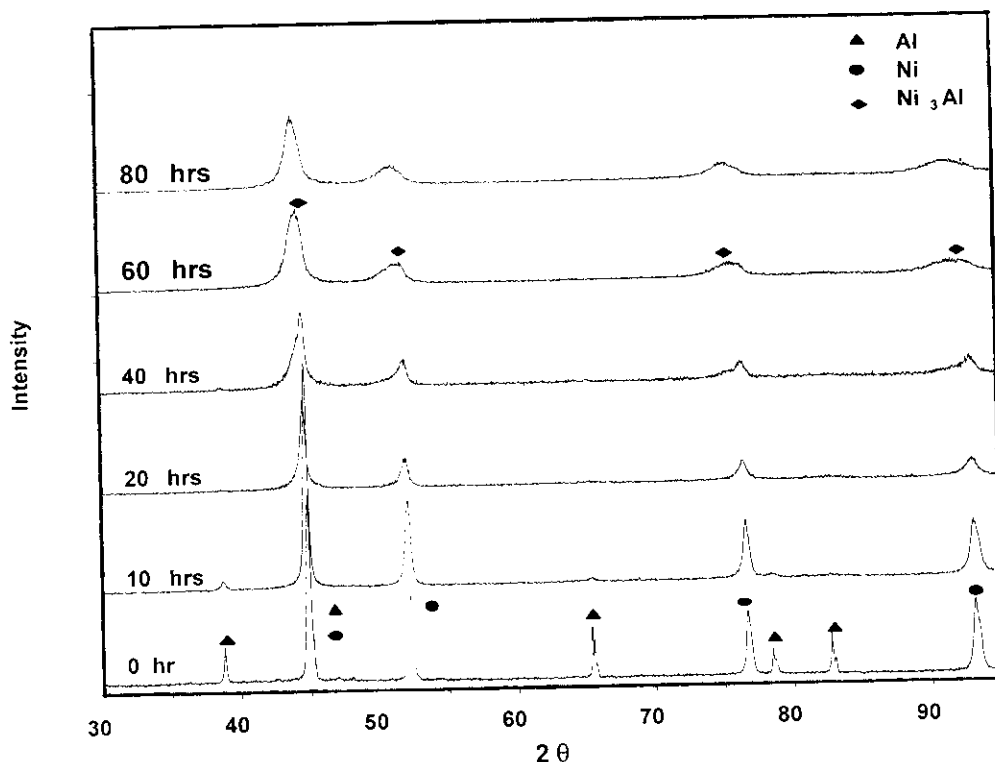


شکل ۳ الگوهای پراش اشعه ایکس از ذرات پودر Ni₇₅Al₂₅ پس از زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی (نمونه ۲)

ترتیب میزان تغییر شکل پلاستیکی ذرات پودر و در نتیجه میزان افزایش دانسیته نقص‌های بلوری و کاهش اندازه دانه‌ها کمتر می‌گردد. همه این عوامل میزان نفوذ عناصر در شرایط آلیاژسازی مکانیکی را کاهش می‌دهد که در نهایت می‌تواند باعث عدم تشکیل فاز Ni_3Al گردد.

تأثیر نسبت وزنی گلوله‌ها به پودر. در نمونه ۳ مقدار پودر مواد اولیه و در نتیجه نسبت وزنی گلوله‌ها به پودر به نصف میزان آن در نمونه ۱ کاهش یافت. شکل (۴) الگوهای XRD از نمونه ۳ پس از زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی را نشان می‌دهد. مقایسه

مقایسه این الگوها با الگوهای ارائه شده در شکل (۱) نشان می‌دهد که میزان افزایش پهنای پیکهای نیکل و آلومینیم پس از زمانهای یکسان آلیاژسازی مکانیکی در شرایطی که سرعت گردش آسیاب به نصف کاهش یافته، کمتر است. بعلاوه این شرایط آلیاژسازی مکانیکی تنها منجر به تشکیل محلول جامد آلومینیم در نیکل می‌گردد به طوری که حتی پس از ۱۰۰ ساعت تنها پیکهای محلول جامد در الگوی XRD وجود دارد و اثری از حضور ترکیب بین فلزی Ni_3Al مشاهده نمی‌شود. این نتایج ناشی از این واقعیت است که با کاهش سرعت گردش آسیاب انرژی جنبشی گلوله‌ها در هنگام برخورد به ذرات پودر کاهش می‌یابد [12]. به این

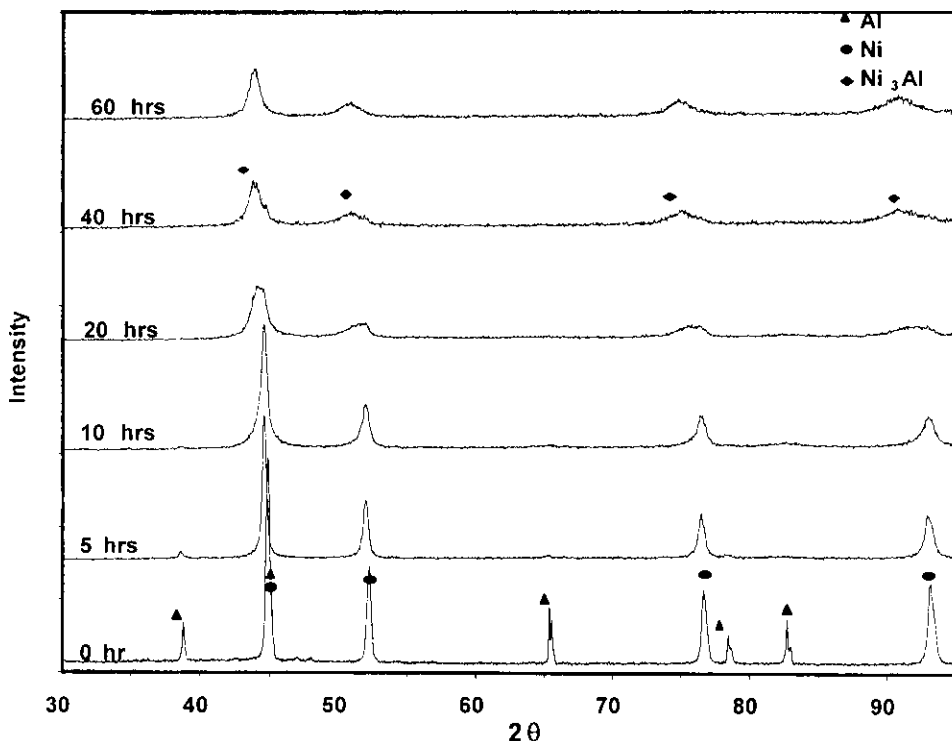


شکل ۴ الگوهای پراش اشعه ایکس از ذرات پودر $Ni_{75}Al_{25}$ پس از زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی (نمونه ۳)

(۵) الگوهای XRD از نمونه ۴ پس از زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش اندازه گلوله‌ها به نصف و افزایش تعداد آنها تا ۸ برابر در حالی که وزن کل گلوله‌ها ثابت نگه داشته شود تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر فرآیند آلیاژسازی مکانیکی ندارد به طوری که زمان تشکیل ترکیب بین فلزی Ni_3Al مشابه با زمان مشاهده شده در سری اول آزمایشها می‌باشد. بدیهی است که با افزایش تعداد گلوله‌ها تعداد برخوردهای گلوله-پودر-گلوله در واحد زمان افزایش می‌یابد که باعث افزایش سرعت فرآیند آلیاژسازی مکانیکی می‌گردد. افزون بر این، کوچکتر شدن اندازه گلوله‌ها باعث می‌شود که مقدار پودری که بین گلوله‌ها به دام می‌افتد نیز کمتر باشد. اما از طرفی دیگر کاهش اندازه و در نتیجه جرم گلوله‌ها باعث کاهش انرژی جنبشی آنها در زمان برخورد می‌شود که کاهش سرعت فرآیند آلیاژسازی

الگوهای XRD در شکل‌های (۱و۴) در زمانهای یکسان آلیاژسازی مکانیکی نشان می‌دهد که با کاهش نسبت وزنی گلوله‌ها به پودر سرعت افزایش پهنای پیکهای نیکل و آلومینیوم کاهش می‌یابد. افزون بر این، زمان تشکیل فاز Ni_3Al از حدود ۲۰ ساعت به حدود ۶۰ ساعت افزایش می‌یابد. با کاهش نسبت وزنی گلوله‌ها به پودر مواد اولیه مقدار انرژی جنبشی گلوله‌ها که در هنگام برخورد به واحد جرم پودر مواد اولیه منتقل می‌شود، کاهش می‌یابد که این بنوبه خود سرعت فرآیندهایی را که در حین آلیاژسازی مکانیکی رخ می‌دهد، کند می‌سازد [13].

تأثیر تعداد گلوله‌ها. برای مطالعه تأثیر تعداد گلوله‌ها نمونه ۴ با گلوله‌هایی با قطر ۱ سانتیمتر آلیاژسازی مکانیکی شد و برای ثابت نگه داشتن وزن کل گلوله‌ها تعداد آنها به ۳۲ عدد افزایش یافت. در شکل



شکل ۵ الگوهای پراش اشعه ایکس از ذرات پودر $Ni_{75}Al_{25}$ پس از زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی (نمونه ۴)

فرآیند آلیاژسازی مکانیکی کاهش می‌یابد به طوری که حتی پس از ۱۰۰ ساعت فاز Ni_3Al تشکیل نمی‌شود.

۴- کاهش نسبت وزنی گلوله‌ها به پودر باعث کاهش سرعت فرآیند آلیاژسازی مکانیکی می‌گردد و زمان تشکیل فاز Ni_3Al از حدود ۲۰ ساعت به حدود ۶۰ ساعت افزایش می‌یابد.

۵- کاهش اندازه گلوله‌های آسیاب (با ثابت نگه‌داشتن نسبت وزنی گلوله‌ها به پودر) در سرعت فرآیند آلیاژسازی مکانیکی تغییر قابل ملاحظه‌ای ایجاد نمی‌کند.

قدردانی

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان برای تأمین هزینه‌های این تحقیق سپاسگزاری می‌شود.

مکانیکی را دنبال دارد. عملکرد معکوس و همزمان این عوامل باعث می‌شود که افزایش تعداد گلوله‌ها، در صورتی که وزن کل آنها ثابت باقی بماند، بر فرآیند آلیاژسازی تأثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد.

نتیجه‌گیری

۱- آلیاژسازی مخلوط پودر نیکل و آلومینیوم با ترکیب $Ni_{75}Al_{25}$ ابتدا منجر به تشکیل ساختاری لایه‌ای از نیکل و آلومینیم می‌گردد که ضخامت لایه‌ها با افزایش زمان آلیاژسازی مکانیکی بتدریج کاهش می‌یابد.

۲- پس از حدود ۱۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی، محلول جامد آلومینیم در نیکل بدست می‌آید که با افزایش زمان به حدود ۲۰ ساعت این محلول به ترکیب بین فلزی Ni_3Al با ساختار نانوکریستال تبدیل می‌گردد.

۳- با کاهش سرعت گردش آسیاب به نصف سرعت

مراجع

1. Stoloff, N. S., and Liu, C. T., "Emerging applications of intermetallics", *Intermetallics*, Vol. 8, pp. 1313-1320, (2000).
2. Stoloff, N. S. "Physical and mechanical metallurgy of Ni_3Al and its alloys", *International Materials Reviews*, Vol. 34, No. 4, pp. 153-183, (1989).
3. Liu, C. T., and Pope, D. P., "*Intermetallic compound: practice*", Vol. 2, John Wiley, New York, pp. 17-47, (2000).
4. Westbrook, J. H., and Fleischer, R. L., "*Intermetallic compound: structural application*", Vol. 3, John Wiley, New York, (2000).
5. Sanmarchi, C., and Mortensen, A., "Reactive infiltration processing of aluminum-nickel intermetallic compound", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 29 A, pp. 2819-2828, (1998).

6. Calka, A., "Mechanical Alloying: Technology and properties of prepared materials", *Key Engineering Materials*, Vol. 81-83, pp. 17-24, (1993).
7. Koch, C. C., and Whittenberger, J. D., "Mechanical milling/alloying of intermetallics, *Intermetallics*, Vol. 4, pp. 339-355, (1996).
8. Cullity, B. D., "*Element of X-ray diffraction*", 2nd ed., Addison-Welsey, Notredame, p. 102, (1978).
9. Koch, C. C., "The synthesis and structure of nanocrystalline, materials produced by mechanical attrition", *Nanostructured Materials*, Vol 2, pp. 109-129, (1993).
10. Fecht, H. J., Helstern, E., Fu, Z., and Johnson, W. L., "Nanocrystalline metals prepared by high-energy ball milling", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 21A, pp. 2333-2337, (1990).
11. Bhattacharya, A. K., and Arzt, E., "Plastic deformation and its influence on diffusion process during mechanical alloying", *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 28, pp. 3895-400, (1993).
12. Abdelloui, M., and Gaffet, E., "The physics of mechanical alloying in a planetary ball mill: mathematical treatment", *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 43, N0. 3, pp. 1087-1098, (1995).
13. Suryanarayana, C., Chen, G., and Fores, F. H., "Milling maps for phase identification during mechanical alloying", *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 26, pp. 1727-1732, (1992).