

## اثر افزودن Mo بر تشکیل ترکیب بین فلزی NiAl نانوساختار حین آلیاژسازی مکانیکی

علی خواجه سروی\* و غلامحسین اکبری

دانشگاه شهید باهنر، بخش مهندسی مواد و متالورژی، کرمان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۳/۰۱/۱۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۳/۰۳/۲۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۳/۰۴/۲۷

### چکیده

آلومیناید های نیکل از جمله مواد پیشرفته‌ای هستند که از خواص مهندسی منحصر بفردی نظیر نقطه ذوب بالا، نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت به خوردگی مناسب در دمای بالا برخوردار می‌باشند. در این پژوهش، اثر افزودن مولیبدن با درصد های اتمی ۱، ۲/۵ و ۵ به آلیاژ نانوساختار با ترکیب شیمیایی  $Ni_{50}Al_{50}$  در یک آسیای سیاره‌ای برای زمان های ۸ و ۱۶ ساعت مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات ساختاری ذرات پودر در طول آلیاژسازی مکانیکی با آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی و دیفراکتومتر اشعه ایکس ارزیابی شد. با آنالیز پراش سنجی اشعه ایکس و بکارگیری روش ویلیامسون-هال، اندازه کریستالیت و کرنش شبکه ذرات پودر آسیاکاری شده محاسبه شد. نتایج نشان داد، اندازه دانه میانگین با افزایش درصد اتمی مولیبدن، در حد چند میکرون کاهش یافت. با افزایش مقدار مولیبدن اندازه کریستالیت کاهش یافت، بطوریکه در نمونه NiAl بدون مولیبدن بعد از ۱۶ ساعت آسیاکاری، اندازه کریستالیت بیش از ۱۰۰ نانومتر شد و با افزایش مولیبدن تا ۵ درصد اتمی این مقدار تا ۶۵ نانومتر کاهش یافت. همچنین کرنش شبکه ابتدا روند افزایشی دارد و سپس با افزایش مولیبدن به مقدار ثابتی رسید.

**واژه‌های کلیدی:** آلیاژسازی مکانیکی، ترکیب بین فلزی، نیکل آلومیناید، نانوساختار، اندازه کریستالیت.

### ۱- مقدمه

خوب، حفظ استحکام تا دمای بالا، مقاومت خمشی، خستگی، خزشی و سایشی خوب و مقاومت به اکسیداسیون، خوردگی و سولفیداسیون مطلوب است. مجموعه خواص فوق ترکیب بین فلزی NiAl را برای بسیاری از کاربردهای سازه‌ای مانند لبه‌های روتور در پره‌های موتور توربین گازی و صنایع هوافضا مورد توجه قرار داده است [۳-۶]. چقرمگی کم در دمای پایین و استحکام خزشی پایین در دمای بالا، موانع اصلی کاربردهای سازه‌ای این ماده است، برای غلبه بر این

ترکیب‌های بین فلزی بدلیل خواص فیزیکی و مکانیکی فوق‌العاده به عنوان فرآیندی مفید جهت تولید مواد همگن با ساختار کنترل شده و خواص یکنواخت مورد توجه محققین و مهندسیین واقع شده است [۱،۲]. ترکیب بین فلزی NiAl دارای خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب از جمله سختی بالا، چگالی پایین ( $5/86 \text{ g/cm}^3$ )، نقطه ذوب بالا (۱۹۱۱ K)، مقاومت به سایش مناسب، هدایت حرارتی

\*عهده‌دار مکاتبات: علی خواجه سروی

نشانی: کرمان، دانشگاه شهید باهنر، بخش مهندسی مواد و متالورژی

تلفن: ۰۳۵۱-۸۲۱۷۲۲۳، دورنگار: ۰۳۵۱-۸۲۱۷۲۲۳، پست الکترونیکی: [alikhajesarvi@yahoo.com](mailto:alikhajesarvi@yahoo.com)

کافی در خواص خزشی NiAl می‌گردد. همچنین در NiAl آلیاژ شده با ۵ درصد کروم، لغزش <۱۱۱> و تغییر مد شکست از بین دانه‌ای به درون دانه‌ای را گزارش کردند [۱۶]. یکی از عناصری که کاستی‌های ترکیب بین فلزی را ارتقاء می‌دهد، مولیبدن می‌باشد که مفیدترین تاثیر آن، افزایش داکتیلیتی دمای اتاق این ترکیب می‌باشد [۱۷]. هدف از این تحقیق، بررسی اثر میکروآلیاژ مولیبدن در پروسه تولید ترکیب بین فلزی نیکل آلومیناید می‌باشد.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

مواد اولیه شامل پودر نیکل با خلوص بیش از ۹۹/۹ درصد وزنی با اندازه ذرات کمتر از ۱۰ میکرون، پودر آلومینیوم با خلوص بیش از ۹۹ درصد وزنی با اندازه ذرات کمتر از ۲۰۰ میکرون و پودر مولیبدن با خلوص بیش از ۹۹/۹۹ درصد وزنی و اندازه ذرات کمتر از ۱۵۰ میکرون استفاده شد. آلیاژسازی در یک آسیا گلوله‌ای سیاره‌ای در دمای محیط با سرعت چرخش ۲۵۰ دور بر دقیقه و نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۱۵ انجام شد. از اتانول به اندازه ۳ درصد وزنی به عنوان عامل کنترل فرآیند استفاده شد. در تمام آزمایش‌ها از ۴ گلوله بزرگ با قطر ۲ سانتیمتر و ۱۲ گلوله کوچک با قطر ۱ سانتیمتر از جنس فولاد بلبرینگ استفاده شد. با تغییر مقدار مولیبدن، نمونه‌هایی با ترکیب  $Ni_{50}Al_{50-x}Mo_x$  (مقادیر x برابر با صفر، ۰/۵، ۲/۵ و ۵ در نظر گرفته شد) در زمان‌های مختلف ۸ و ۱۶ ساعت آسیا شدند. نمونه‌ها بلافاصله بعد از اتمام زمان آسیاکاری، از محفظه تخلیه شدند. تغییرات ساختاری ذرات پودر با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس بررسی شد. در این آزمایش از تشعشع  $Cu-K\alpha$  تحت ولتاژ ۴۰ kV و جریان ۳۰ mA با طول موج ۰/۱۵۴۲ نانومتر استفاده شد. روش ویلیامسون-هال برای محاسبه تغییرات اندازه کریستال‌ها و پارامتر شبکه کریستالی بکار گرفته شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- نحوه تشکیل آلومیناید نیکل

واکنش میان مخلوط پودری بلافاصله پس از باز شدن درب ظرف در زمان‌های مختلف به دو صورت مشاهده شد:

مشکل‌ها راه حل‌های گوناگونی مانند کاهش اندازه ریزساختار مواد تا ابعاد نانومتر و استفاده از عناصر آلیاژی پیشنهاد شده است [۷]. ترکیب بین فلزی NiAl به روش‌های مختلفی همچون ریخته‌گری (به صورت تک کریستال و پلی کریستال)، انجماد سریع و روش‌های متالورژی پودر (شامل روش‌های متالورژی پودر، سنتز احتراقی و آلیاژسازی مکانیکی) تولید می‌گردد. تولید ترکیب NiAl با روش متالورژی پودر، با توجه به نقطه ذوب بالای این ترکیب و قابلیت‌های این روش، مورد مطالعه بسیاری از محققین قرار گرفته است. روش آلیاژسازی مکانیکی بدلیل دستیابی به ساختاری ریز در حد نانومتر و امکان ساخت نانوکامپوزیت‌های زمینه NiAl همراه با ذرات تقویت کننده اکسیدی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [۹، ۸، ۱۱]. آلیاژسازی مکانیکی تاکنون جهت ساخت مواد نانوکریستال با موفقیت بکار گرفته شده است. پژوهشگران زیادی ساخت ترکیب بین فلزی نانوکریستال NiAl را با آلیاژسازی مکانیکی پودر مواد اولیه گزارش کرده‌اند [۱۰، ۱۱]. گزارش‌های کمی در مورد آلیاژسازی مکانیکی پودرهای NiAl و عنصر سوم موجود است. علیزاده و همکاران تولید ترکیب بین فلزی نانوساختار  $Ni_{50}Al_{50-x}Cr_x$  به روش آلیاژسازی مکانیکی را مورد بررسی قرار دادند و اثبات کردند که حضور Cr در سیستم NiAl منجر به سریع‌تر تشکیل شدن آلومیناید نیکل در هوا می‌شود [۱۱]. هانگ و همکاران سیستم  $Ni(Al,Ti)$  را بررسی کردند و سنتز نانوکریستال  $Ni_2AlTi$  و فاز  $Ni_3(Al,Ti)$  را در طول آلیاژسازی مکانیکی این سیستم سه‌تایی گزارش کردند [۱۲]. آلبیتر و همکاران اثر اضافه کردن Mo، Fe و Ga در طول آلیاژسازی مکانیکی در سیستم NiAl را بررسی کردند و تشکیل محلول جامد با ساختار بین فلزی NiAl را گزارش کردند [۱۳]. لیو و همکارانش اثر اضافه کردن عنصر Ru به پودر عناصر Ni و Al در طول آلیاژسازی مکانیکی را بررسی کردند و سنتز ساختار تک فاز  $(Ru,Ni)Al$  را بطور مستقیم گزارش کردند [۱۴]. عطارزاده و همکاران سیستم  $NiAlCo$  را بررسی کردند و تشکیل ترکیب بین فلزی NiAl در زمان‌های اولیه آسیاکاری بصورت واکنشی احتراقی یا انفجاری بعد از باز شدن درب فلزی آسیا را گزارش کردند [۱۵]. نوبه و همکارانش نشان دادند ساختار لایه‌ای و میله‌ای یوتکتیک‌های NiAl با Mo باعث افزایش

به اندازه کافی در شبکه نیکل قرار گرفت، محلول جامد آلومینیوم نیکل تصادفی به ترکیب بین فلزی منظم تبدیل و گرما آزاد می‌شود [۱].

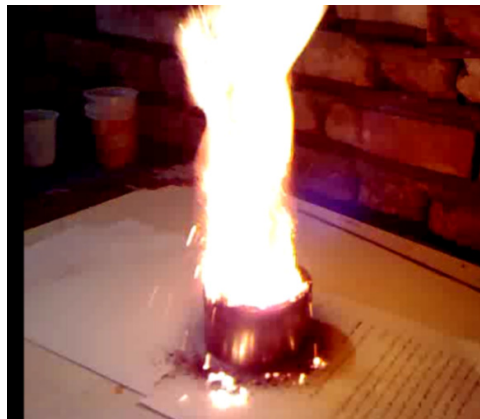


با توجه به اینکه جای اتم‌های آلومینیوم و نیکل در شبکه کریستالی ترکیب بین فلزی مشخص است [۷]، در نتیجه پیوندها با ترکیب خاصی تشکیل می‌شوند و گرما آزاد می‌کنند. حال تعداد خیلی زیادی از ذرات این آمادگی را پیدا می‌کنند که از حالت محلول تصادفی به ترکیب بین فلزی منظم نیکل آلومینیوم تبدیل شوند. پس از باز شدن درب محفظه در اثر ورود هوا و اکسید شدن سطوح ذرات آلومینیوم باقیمانده و تولید گرما، سطح پودر داغ می‌شود و شرایط برای شروع تبدیل نیکل آلومینیوم محلول به ترکیب بین فلزی NiAl فراهم می‌شود. در واکنشی که در رابطه ۱ اتفاق می‌افتد، گرما آدیاباتیک است و موجب افزایش شدید دما می‌شود. هر چه دما بالاتر می‌رود، سرعت تبدیل محلول نیکل-آلومینیوم به ترکیب بین فلزی NiAl بیشتر می‌شود و در نتیجه همین گرما، شعله ایجاد می‌شود.

### ۳-۲- مورفولوژی ذرات پودر

در ساعت‌های اولیه آسیاکاری به این دلیل که ذرات پودر نرم هستند، متحمل تغییر فرم پلاستیک شدیدی می‌شوند و چون تمایل ذرات به جوش خوردن بیشتر است، اندازه ذرات نسبت به حالت اولیه‌شان افزایش پیدا می‌کند [۱]. در زمان ۱۶ ساعت، بعد از باز شدن درب محفظه بدلیل شعله‌ای که وجود دارد نوعی زینترینگ رخ می‌دهد و محلول جامد (Ni,Al) به ترکیب بین فلزی NiAl تبدیل می‌شود و ذرات شدیداً تحت تاثیر این فرآیند قرار می‌گیرند. ترکیب بین فلزی تشکیل شده و یا نیکل و آلومینیومی که باقی مانده‌اند، بهم می‌چسبند و ذرات توده‌ای شکل بوجود می‌آورند (شکل ۲). علیزاده و همکاران [۱۱] سیستم نیکل-آلومینیوم-کروم را بررسی کردند و گزارش نمودند که با شروع عملیات آسیاکاری، ذرات پودر پهن شده‌اند.

الف) پس از باز شدن درب ظرف در زمان ۸ ساعت، واکنشی میان مخلوط پودری مشاهده نشد، ب) بلافاصله بعد از باز شدن درب ظرف در زمان ۱۶ ساعت، واکنش میان مخلوط پودری بصورت شعله مشاهده شد (شکل ۱). جزئیات واکنش میان مخلوط پودری با در نظر گرفتن ترکیب شیمیایی و زمان آسیاکاری در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱: واکنش همراه با شعله پس از ۱۶ ساعت آسیاکاری.

جدول ۱: مشاهدات مراحل آلیاژسازی مکانیکی

در زمان‌ها و ترکیب‌های مختلف.

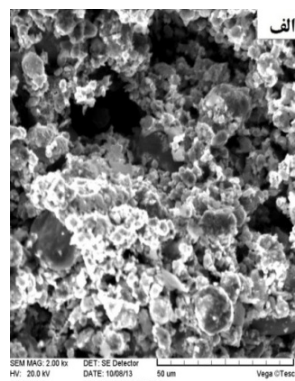
شماره نمونه	استوکیومتری	۸ ساعت	۱۶ ساعت
۱	NiAl	■	★
۲	NiAl <sub>49</sub> Mo <sub>1</sub>	■	★
۳	NiAl <sub>47.5</sub> Mo <sub>2.5</sub>	■	★
۴	NiAl <sub>45</sub> Mo <sub>5</sub>	■	★
■: عدم واکنش پس از باز کردن درب ظرف			
★: انجام واکنش پس از باز کردن درب ظرف			

در این فاصله زمانی ذرات شروع به ریز شدن کرده و انرژی ناشی از ضربات متعدد در مناطق مختلف ظرف پخش شده است و تقریباً هیچ نقطه‌ای از ظرف نیست که آماده احتراق نباشد [۱۸]. مکانیزم ایجاد شعله و تشکیل نیکل آلومیناید این است که با گذشت مدت زمانی از آسیاکاری، اتم‌های نیکل و آلومینیوم در هم حل می‌شوند و مقداری محلول جامد (Al,Ni) تشکیل می‌شود. به این علت که فرآیند نفوذ، تصادفی است، اتم‌های آلومینیوم بصورت تصادفی در شبکه نیکل حل می‌شوند. اما وقتی آلومینیوم

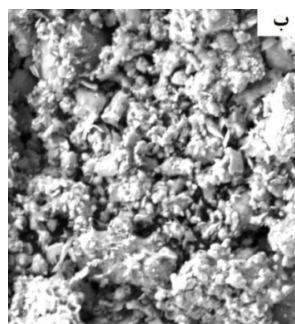
با افزایش زمان آسیاکاری و باز کردن درب ظرف در اثر شعله‌ای که وجود دارد نوعی زینترینگ بین پودرها رخ می‌دهد که باعث چسبیدن پودرها بهم می‌شود. مقادیر مختلف مولیبدن تأثیر کمی بر روند تغییرات اندازه متوسط ذرات پودر در زمان ۱۶ ساعت داشته است. کاهش در اندازه ذرات پودر را می‌توان به حل شدن بیشتر اتم‌های مولیبدن در زمینه نیکل نسبت داد. با حل شدن اتم‌های مولیبدن در زمینه نیکل اثرات کارسختی افزایش می‌یابد و در نتیجه ذرات پودری تردتر و شکست آنها بیشتر اتفاق می‌افتد که باعث ریزتر شدن آنها می‌شود. عناصر آلیاژی بطور کلی با حل شدن در کریستال‌های فلزی و ایجاد اعوجاج در کریستال، کارسختی در فرآیند کارسرد را افزایش می‌دهند [۱۹،۲۰]. البته با اشباع شدن مولیبدن در شبکه Ni، تأثیر آن کاهش می‌یابد.

### ۳-۳- آنالیز فازی

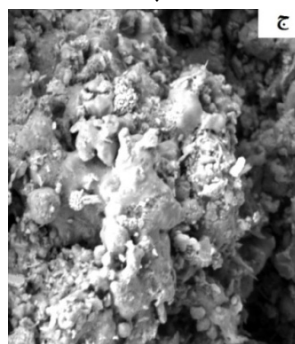
شکل ۳ الگوهای XRD مخلوط اولیه پودر و نمونه‌های آلیاژی‌سازی مکانیکی شده با درصد‌های مختلف مولیبدن، در مدت زمان ۱۶ ساعت را نشان می‌دهد. همانطور که در الگوی XRD مربوط به نمونه قبل از آسیاکاری مشاهده می‌شود، فقط عناصر خالص Ni، Al و Mo در الگوی پراش وجود دارد. پس از ۱۶ ساعت آسیا کردن از شدت پیک‌های Ni، Al کاسته شده و پهنای پیک‌ها عریض‌تر شده است. پیک‌های پراش مولیبدن با جابجایی ناچیز به سمت زوایای بیشتر، پهن‌تر شده است. همچنین با افزایش مولیبدن فازهای جدیدی مانند  $Al_5Mo$ ،  $Al_8Mo_3$  و  $Mo_2C$  در الگوی پراش مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد  $Mo_2C$  از طریق واکنش مولیبدن با مقدار کمی از اتانول اضافه شده به پودرها به عنوان عامل کنترل فرآیند، تشکیل شده است. به علت شعله‌ای که اتفاق می‌افتد پیک‌های بسیار کوچک اکسید آلومینیوم و نیکل نیز مشاهده می‌شود که نشان از مقدار کم آن در ترکیب است. جابجایی ناچیز پیک‌های پراش نیکل به سمت ۲۵ بیشتر تشکیل محلول جامد را پیش‌بینی می‌کند. پس از ۱۶ ساعت آسیاکاری، شدت کاهش پیک آلومینیوم نسبت به نیکل بسیار شدیدتر است. این مسأله می‌تواند بدلیل تغییر شکل نسبتاً زیادی باشد که پودر آلومینیوم در حین فرآیند متحمل



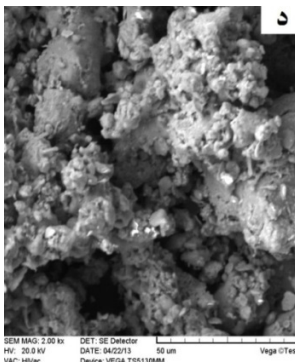
(الف)



(ب)



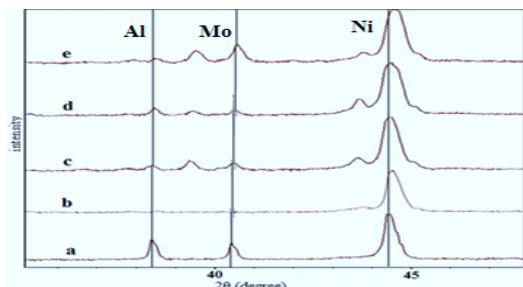
(ج)



(د)

شکل ۲: تصاویر SEM پودرهای آسیا شده به مدت ۱۶ ساعت (الف) ۰٪، (ب) ۱٪، (ج) ۲٪ و (د) ۵٪ اتمی مولیبدن.

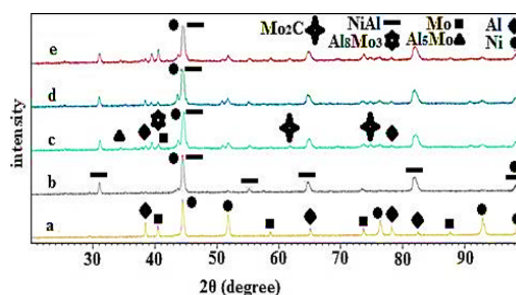
مولیبدن تا ۴/۰۷۰۷ آنگستروم افزایش می‌یابد ولی در ۵ درصد اتمی مولیبدن این مقدار به ۴/۰۵۴۵ آنگستروم کاهش می‌یابد.



شکل ۴: مقایسه پیک اصلی نیکل، آلومینیوم و مولیبدن برای چهار نمونه، (a) مخلوط پودری آسیا نشده و پودرهای آسیا شده به مدت ۱۶ ساعت، (b) ۰٪، (c) ۱٪، (d) ۲/۵٪ و (e) ۵٪ اتمی مولیبدن.

با توجه به اندازه اتمی عناصر موجود در سیستم (Al=۰/۱۴۳، Mo=۰/۱۳۶، Ni=۰/۱۲۴ nm) دلیل اصلی جابجایی پیک نیکل در نمونه ۱ درصد اتمی مولیبدن نسبت به نمونه صفر درصد به سمت زوایای کمتر را به این صورت می‌توان توضیح داد. بدلیل بزرگتر بودن اندازه اتمی مولیبدن نسبت به نیکل و همچنین با توجه به دیباگرام فازی Ni-Mo (شکل ۷) و مشاهده قابلیت انحلال زیاد عنصر مولیبدن در نیکل، در اثر انحلال مولیبدن در شبکه نیکل (شکل ۵)، پارامتر شبکه نیکل افزایش می‌یابد و پیک ناشی از پراش عنصر نیکل به سمت زوایای کمتر جابجا می‌شود. از طرف دیگر ورود آلودگی‌های غیرقابل اجتناب از ابزار آسیا (گلوله‌ها و ظرف) به مخلوط پودری می‌تواند دلیلی برای جابجایی پیک‌ها باشد [۷]. در نمونه ۲/۵ درصد اتمی مولیبدن، پارامتر شبکه نیکل کاهش یافته و پیک نیکل به سمت زوایای بیشتر جابجا شده است. برای نمونه ۵ درصد اتمی مولیبدن ضمن افزایش جابجایی، پارامتر شبکه هم بیشتر شده است. هنگامی که اتم‌های Al و Mo در شبکه Ni حل می‌شود، به این علت که الکترون‌های ظرفیت اتم‌های Al و Mo با الکترون‌های ظرفیت اتم Ni متفاوت است، بالانس الکترون‌های ابر الکترونی بهم می‌خورد و در نتیجه جاهای خالی ایجاد می‌شود و این باعث تغییر در پارامتر شبکه و حرکت پیک نیکل به سمت زوایای بیشتر می‌شود. پهن شدن پیک

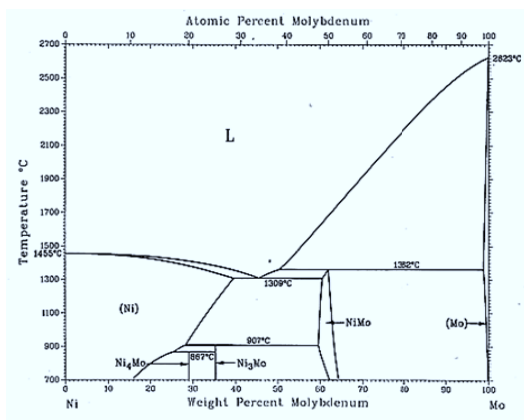
شده و اندازه کریستالی آن به حد نانومتر می‌رسد. این پدیده باعث پهن شدن و کاهش ارتفاع پیک‌های Al می‌شود [۲۱]. عناصر با عدد اتمی کمتر و در نتیجه با فاکتور پراکندگی اتمی کمتر دارای شدت پیک کمتری بوده و در نتیجه پیک‌های آنها در مقایسه با عناصر با عدد اتمی بیشتر سریع‌تر ناپدید می‌شود [۱۱].



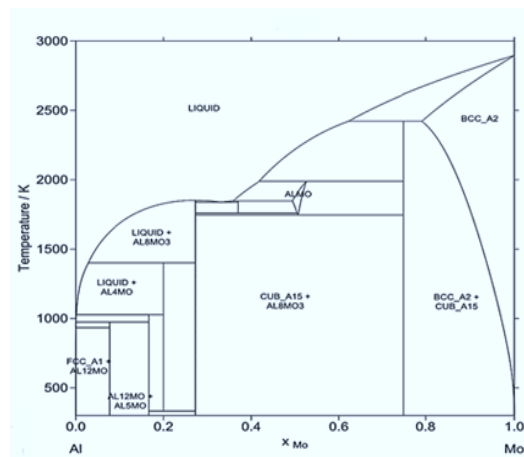
شکل ۳: الگوهای XRD برای پنج نمونه، (a) مخلوط پودری آسیا نشده و پودرهای آسیا شده به مدت ۱۶ ساعت، (b) ۰٪، (c) ۱٪، (d) ۲/۵٪ و (e) ۵٪ اتمی مولیبدن.

موقعیت قرارگیری پیک اصلی نیکل، آلومینیوم و مولیبدن با جزئیات بیشتر در شکل ۴ مقایسه شده است. این شکل اثر مقدار مولیبدن و زمان آسیاکاری در تحولات ساختاری صورت گرفته در شبکه نیکل و آلومینیوم را نمایش می‌دهد. پیک نیکل برای چهار نمونه آسیاکاری شده نسبت به نمونه آسیا نشده جابجا شده و این جابجایی به سمت زوایای بیشتر صورت گرفته است. همانگونه که مشخص است نمونه صفر درصد اتمی مولیبدن نسبت به نمونه پودری آسیا نشده به سمت زوایای بیشتر جابجا شده است. برای نمونه ۱ درصد اتمی مولیبدن این جابجایی نسبت به نمونه صفر درصد کاهش یافته، ولی برای نمونه‌های ۲/۵ و ۵ درصد اتمی مولیبدن جابجایی نسبت به نمونه صفر درصد اتمی افزایش یافته است. همچنین تغییرات پارامتر شبکه Ni و Al با تغییر مقدار مولیبدن در زمان ۱۶ ساعت آسیاکاری در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود. پارامتر شبکه نیکل با افزایش مولیبدن تا ۱ درصد اتمی افزایش و سپس با افزایش آن تا ۲/۵ درصد اتمی کاهش می‌یابد. در ۵ درصد اتمی مولیبدن، پارامتر شبکه به ۳/۵۴۶۵ آنگستروم افزایش می‌یابد. همچنین پارامتر شبکه آلومینیوم برای ۱ و ۲/۵ درصد اتمی

شدید ذرات، عیوب کریستالی و به دنبال آن نابجایی‌ها زیاد می‌شوند در نتیجه مرزهای فرعی تشکیل می‌شوند. مرزهای فرعی و نابجایی‌ها مسیرهای بازتری را برای حرکت اتم‌های مولیبدن ایجاد می‌کنند و با تغییر فرم پلاستیک بیشتر ذرات، مرزهای فرعی جابجا می‌شوند ولی اتم‌های مولیبدن جابجا نمی‌شوند. با تکرار این امر، امکان نفوذ اتم‌های مولیبدن بیشتر می‌شود و این موضوع مویید این است که مولیبدن به مقدار خیلی کم در شبکه آلومینیوم حل می‌شود. کاهش پارامتر شبکه Al در نمونه ۵ درصد اتمی مولیبدن به این علت است که با افزایش عنصر مولیبدن و حلالیت آن در شبکه آلومینیوم، چون محلول غیرتعدالی فوق اشباع ناپایدار است، ترکیب بین فلزی تشکیل می‌شود. مولیبدن ممکن است از حلالیت خارج شود و دوباره پارامتر شبکه را کاهش دهد.

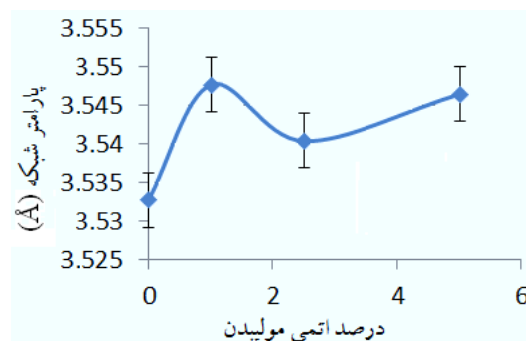


شکل ۷: دیگرام تعادلی Ni-Mo.

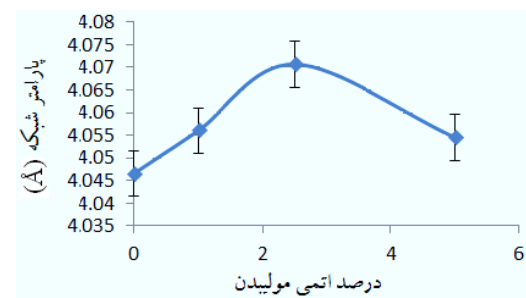


شکل ۸: دیگرام تعادلی Al-Mo.

نیکل به زوایای بزرگتر به این دلیل می‌باشد که در اثر آسیاکاری مخلوط پودری و اعمال شدید فرآیندهای کار مکانیکی روی ذرات پودر، کارسرد و تغییر فرم‌های شدید پلاستیکی دانسیته عیوبی مانند نابجایی‌ها و نقص‌های چیده شدن افزایش می‌یابد. این پدیده خود باعث افزایش کرنش‌های الاستیک و همچنین ریز شدن اندازه دانه‌های Ni و Al می‌شود که هر دو، عامل افزایش پهنای پیک‌های Al و Ni است [۷].



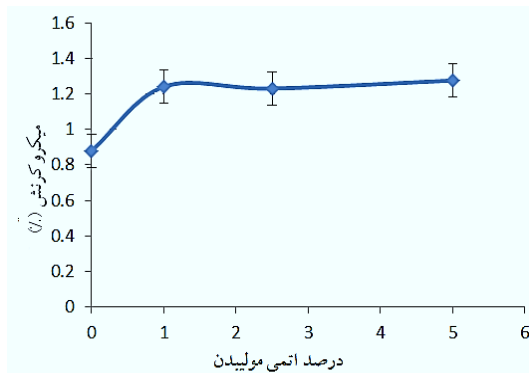
شکل ۵: تغییرات پارامتر شبکه Ni با تغییر مقدار مولیبدن در زمان ثابت ۱۶ ساعت.



شکل ۶: تغییرات پارامتر شبکه Al با تغییر مقدار مولیبدن در زمان ثابت ۱۶ ساعت.

پیک آلومینیوم برای نمونه‌های آسیا شده در مقایسه با نمونه آسیا نشده تقریباً جابجایی ندارد. در یک زمان آسیاکاری ثابت، با افزایش میزان مولیبدن تغییری در محل قرارگیری پیک Al مشاهده نمی‌شود. با توجه به دیگرام فازی Al-Mo (شکل ۸)، امکان حلالیت مولیبدن در آلومینیوم ناچیز است. ولی با توجه به شکل ۶ برای نمونه Al با ۱ و ۲/۵ درصد مولیبدن پارامتر شبکه افزایش یافته است. تغییر فرم پلاستیک شدید ذرات مکانیزم اصلی یا تسهیل کننده حلالیت است. با تغییر فرم پلاستیک

مولیبیدن، افزایش شدیدی در میزان میکروکرنش دریافتی روی می‌دهد و میزان میکروکرنش ذخیره شده در ذرات پودری افزایش می‌یابد. سپس در ۲/۵ و ۵ درصد اتمی مولیبیدن این مقدار تقریباً ثابت می‌ماند.



شکل ۱۰: تغییرات میکروکرنش دریافتی ذرات پودری از آسیا با تغییر مقدار مولیبیدن.

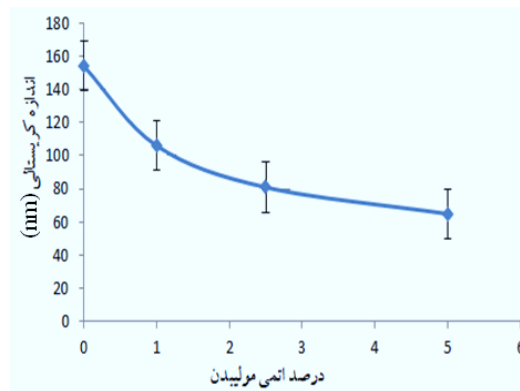
به عبارت دیگر می‌توان گفت با افزایش میزان مولیبیدن، میکروکرنش بیشتری از طرف ابزار آسیا به ذرات پودری منتقل می‌شود. بوجود آمدن میکروکرنش در پودرها به علت وجود میکروتنش‌ها و تشکیل و تکثیر نابجایی در پودرها می‌باشد. میکروتنش‌ها حاصل عیوب نقطه‌ای مانند عیوب جانشینی و جای خالی می‌باشد. این میکروتنش‌ها ممکن است از نوع تنش کششی یا از نوع فشاری باشد. عیوب جای خالی باعث بوجود آمدن تنش‌های کششی در ماده می‌شوند در حالیکه عیوب جانشینی باعث ایجاد تنش فشاری در شبکه می‌شوند. با اضافه کردن مولیبیدن عیوب ایجاد شده در ماده خصوصاً نابجایی‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان کرنش در ماده در مقایسه با ترکیب NiAl افزایش می‌یابد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

ترکیب بین فلزی نانوکریستال NiAl با اضافه کردن عنصر میکروآلیاژ Mo توسط فرآیند آلیاژسازی مکانیکی طی فرآیندی گرمازا بدست آمد. افزایش Mo باعث بوجود آمدن فازهای جدیدی از جمله Mo<sub>2</sub>C می‌شود. این فاز را می‌توان به واکنش بین Mo و اتانول نسبت داد. افزایش مولیبیدن، در اصلاح ریزساختار تاثیر زیادی دارد. تغییرات

#### ۳-۴- تغییرات اندازه کریستالی

شکل ۹ روند تغییرات اندازه کریستالی نمونه‌های ۱۶ ساعت آسیا شده با مقادیر مختلف مولیبیدن را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار مولیبیدن، تغییرات اندازه دانه در ابتدا بسیار شدید و سپس با رسیدن به حالت اشباع، تغییرات کاهش می‌یابد. همانطور که مشخص است اندازه کریستالی در نمونه بدون مولیبیدن حدود ۱۵۴ نانومتر بوده (روش XRD برای تعیین اندازه دانه‌های کمتر از ۱۰۰ نانومتر مناسب است، بنابراین این اندازه‌گیری خیلی دقیق نیست) و با افزایش مولیبیدن تا ۵٪ اتمی به ۶۵ نانومتر کاهش یافته است.



شکل ۹: تغییرات اندازه دانه با تغییر میزان مولیبیدن برای نمونه‌های ۱۶ ساعت آسیا شده.

با افزایش مولیبیدن تغییر فرم پلاستیک و کارسرد شدن ذرات بیشتر می‌شود و عیوبی مانند نابجایی‌ها و نقص‌های چیده شدن افزایش می‌یابد. با تجمع نابجایی‌ها، مرزهای فرعی بیشتری تشکیل می‌شود و در نتیجه اندازه دانه‌ها کوچکتر می‌شود. کاهش شدید اندازه دانه یکی از روش‌های بهبود داکتیلیتی تشخیص داده شده است [۱۵] بطوریکه ابعاد نانومتری دانه‌ها باعث بهبود بیشتری در داکتیلیتی و مقاومت خزشی در مقایسه با دانه‌های میکرونی شده است [۱۵، ۲۲].

#### ۳-۵- تغییرات کرنش شبکه

شکل ۱۰ تغییرات میکروکرنش دریافتی توسط ذرات پودری را از طرف ابزار آسیا با تغییر درصد مولیبیدن نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است با افزایش مقدار

[8] K. Huai, J. Guo, Q. Gao, H. Li, R. Yang, *Intermetallics*, **15**, 2007, 749.

[۹] مهیار محمدنژاد، مرتضی شمعانیان، محمد حسین عنایتی، مهدی صالحی، "تاثیر پارامترهای فرآیند بر تشکیل پوشش نانوساختار NiAl بر سطح فولاد ساده کربنی به روش آسیاکاری"، علوم و مهندسی سطح، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۱.

[10] M. Enayati, F. Karimzadeh, S. Anvari, *Journal of Materials Processing Technology*, **200**, 2008, 312.

[11] M. Alizadeh, G. Mohammadi, G.H. Fakhraabadi, M.M. Aliabadi, *Journal of Alloys and Compounds*, **505**, 2010, 64.

[12] H.H. Sheu, L.C. Hsiung, J.R. Sheu, *Journal of Alloys and Compounds*, **469**, 2009, 483.

[13] A. Albiter, E. Bedolla, R. Perez, *Materials Science and Engineering*, **328**, 2002, 80.

[14] K. Liu, F. Mucklich, W. Pitschke, R. Birringer, K. Wetzig, *Materials Science and Engineering*, **313**, 2001, 187.

[۱۵] حمید عطارزاده، "بررسی اثر کبالت در فرآیند تولید ترکیب بین فلزی NiAl نانوساختار به روش آلیاژسازی مکانیکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ۱۳۹۲.

[16] R.D. Noebe, R.R. Bowman, M.V. Nathal, "The Physical and Mechanical Metallurgy of NiAl", Springer, 1996.

[17] A. Albiter, M. Salazar, E. Bedolla, R. Drew, R. Perez, *Materials Science and Engineering*, **347**, 2003, 154.

[18] E. Liu, J. Jia, Y. Bai, W. Wang, Y. Gao, *Materials and Design*, **53**, 2014, 596.

[19] G. Akbari, M. Taghian Dehaqani, *Powder Metallurgy*, **54**, 2011, 19.

[20] M. Azimi, G. Akbari, *Journal of Alloys and Compounds*, **509**, 2011, 27.

[21] M. Moshksar, M. Mirzaee, *Intermetallics*, **12**, 2004, 1361.

[22] S.V. Raj, *Materials Science and Engineering*, **356**, 2003, 283.

اندازه دانه در ابتدا بسیار شدید و سپس با رسیدن به حالت اشباع، کاهش می‌یابد. اندازه کریستالی در نمونه NiAl بدون مولیبدن حدوداً ۱۵۴ نانومتر بوده و با افزایش مولیبدن تا ۵٪ اتمی به ۶۵ نانومتر کاهش می‌یابد. همچنین، میکروکنش دریافتی ذرات پودر از ابزار آسیا با افزایش مولیبدن افزایش می‌یابد. پهن شدن پیک‌های XRD در حین آلیاژسازی مکانیکی عمدتاً در اثر کاهش اندازه کریستالی و افزایش در کنش شبکه است.

## مراجع

[1] G.H. Akbari, H. Attarzadeh, A. Khajesarvi, *Advanced Materials Research*, **829**, 2014, 115.

[2] M. Alizadeh, *Materials Letters*, **67**, 2012, 148.

[3] S. Moussa, M.S. El-Shall, *Journal of Alloys and Compounds*, **440**, 2007, 178.

[4] N. Duman, A.O. Mekhrabov, M.V. Akdeniz, *Intermetallics*, **23**, 2012, 217.

[5] E. Kubaski, *Powder Technology*, **214**, 2011, 77.

[6] S. Anvari, F. Karimzadeh, M. Enayati, *Journal of Alloys and Compounds*, **477**, 2009, 178.

[۷] غفار محمدی، "تولید ترکیب بین فلزی نانوساختار Ni<sub>50</sub>Al<sub>50-x</sub>Co<sub>x</sub> به روش آلیاژسازی مکانیکی و بررسی خواص مکانیکی آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ۱۳۸۹.