

ارزیابی ریزساختاری آلیاژ Ni-Nb-Si در حین فرایند آلیاژسازی مکانیکی

غلامحسین اکبری^۱، محمدحسین عنایتی^۲ و حسین مینویی^{۱*}

۱. بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه باهنر کرمان

۲. دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۸ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۷/۱۶)

چکیده- در این پژوهش از فرایند آلیاژسازی مکانیکی برای تولید آلیاژ آمورف در سیستم Ni-Nb-Si استفاده شد. آزمون‌های پراش پرتو ایکس و تصاویر میکروسکوپی الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا، تشکیل فاز آمورف را پس از ۱۲ ساعت فرایند آلیاژسازی مکانیکی تأیید کرد. نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مورفولوژی ذرات در حین فرایند آلیاژسازی مکانیکی نشان داد که با افزایش زمان آسیاکاری، اندازه ذرات پودر کمتر و شکل آنها یکنواخت‌تر می‌شوند. افزایش نرخ کارسختی باعث ایجاد تردی، افزایش نرخ شکست و به دنبال آن کاهش اندازه ذرات پودر (3 ± 2) میکرومتر شد. پس از دو ساعت آلیاژسازی مکانیکی ساختار لایه‌ای حاصل از قرار گرفتن لایه‌های متناوب از عناصر اولیه مختلف مشاهده شد. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع پودر نشان داد، افزایش زمان آسیاکاری سبب کاهش فواصل بین لایه‌ها و توزیع یکنواخت‌تر عناصر و در نهایت ایجاد ساختار یکنواختی از فاز آمورف کامل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آلیاژسازی آلیاژسازی مکانیکی، آلیاژ آمورف، آلیاژ پایه نیکل.

Evaluation of the Microstructure of Ni-Nb-Si Alloy During Mechanical Alloying

G. H. Akbari¹, M. H. Enayati² and H. Minouei^{1*}

1. Department of Metallurgy and Materials Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

2. Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Abstract: In the present study, the mechanical alloying process was used to produce the Ni-Nb-Si amorphous alloy. X-ray diffraction (XRD) analysis and high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM) were used to approve the amorphous phase formation after 12 hours of mechanical alloying. The results obtained from the SEM morphological images of powder particles during mechanical alloying showed that increasing the milling time caused the reduction of the powder particles size and uniformity in the shape of the particles. Enhancing the embrittlement and fracturing rate caused brittleness and the increase in the failure rate; these were followed by a decrease in the powder particle size to $1-5\mu\text{m}$. Cold welding and flattening of the pure elemental powders after mechanical alloying for 2 hours formed a lamellar structure of the alternative layers of different elements lying over each other. SEM image of cross-section of powder particles showed that by increasing the milling time, the interlamellar spacing was decreased, the elements were distributed more uniformly, and finally, a uniform structure of the amorphous phase was completed.

Keywords: Mechanical Alloying, Amorphous Alloy, Nickel-Based Alloy.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h_minouie@yahoo.com

مواد فلزی آمورف در مقایسه با آلیاژهای کریستالی دارای خواص ویژه‌ای نظیر استحکام تسلیم بالا، حد الاستیک زیاد، مقاومت به سایش و خوردگی خوب هستند. وجود این خواص منحصر به فرد به علت وجود ساختار اتمی نامنظم در این گونه از مواد است و باعث شده به عنوان یک ماده کاربردی در طول دهه‌های گذشته توسط محققین مورد توجه قرار بگیرند [۱-۴]. در این میان آلیاژهای آمورف پایه نیکل با دارا بودن توانایی بالا در ایجاد ساختار آمورف به روش‌های حالت جامد و مایع یکی از مهم‌ترین آلیاژهای آمورف محسوب می‌شوند [۵ و ۶].

فرایند آلیاژسازی مکانیکی به عنوان یک روش متداول حالت جامد برای ساخت مواد با ساختارهای غیرتعدالی نظیر مواد آمورف شناخته شده است [۷]. در این فرایند میزان عیوب کریستالی در حین آلیاژسازی در نتیجه سطح انرژی آزاد مخلوط پودر افزایش می‌یابد. زمانی که انرژی آزاد مخلوط پودر در حین فرایند از سطح انرژی آزاد آلیاژ آمورف افزایش یابد، امکان تشکیل فاز آمورف به وجود می‌آید [۸ و ۹]. تشکیل فاز آمورف در فرایند آلیاژسازی مکانیکی به انرژی ایجاد شده توسط آسیا و خواص ترمودینامیکی سیستم آلیاژی بستگی دارد [۷]. قوانین ارائه شده توسط اینوه که برای ساخت آلیاژهای آمورف دنبال می‌شود عبارتند از: (۱) اختلاف شعاع اتمی بیشتر از ۱۲ درصد بین اجزاء سازنده سیستم، (۲) وجود مقدار گرمای انحلال زیاد بین اجزاء سیستم و (۳) چند جزئی بودن سیستم. از لحاظ سینتیکی فاز آمورف فقط زمانی قابل تشکیل است که واکنش آمورف شدن سریع‌تر از تشکیل فازهای کریستالی باشد [۱۰].

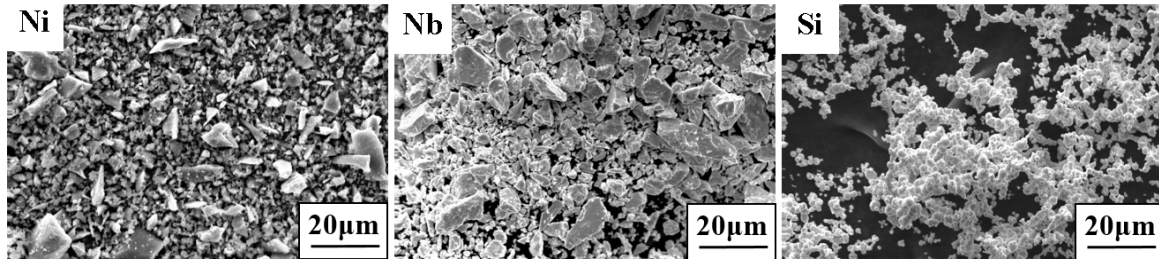
هدف از پژوهش حاضر مطالعه تغییرات ریزساختاری تشکیل فاز آمورف در طول فرایند آلیاژسازی مکانیکی برای سیستم Ni-Nb-Si است. به این منظور آلیاژ $Ni_{55}Nb_{35}Si_{10}$ با روش آلیاژسازی مکانیکی تولید و مورفولوژی و سطح مقطع پودرها در زمان‌های مختلف آسیاکاری با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت. تشکیل فاز آمورف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری و الگوی پراش پرتو ایکس بررسی شد.

در این تحقیق مواد اولیه شامل پودرهای نیکل، نیوبیم و سیلیسیم با مشخصات ارائه شده در جدول (۱) برای ساخت آلیاژ $Ni_{55}Nb_{35}Si_{10}$ (درصد اتمی) با هم مخلوط و تحت فرایند آلیاژسازی مکانیکی قرار گرفتند. مورفولوژی ذرات پودر در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی شکل (۱) نشان داده شده است. فرایند آلیاژسازی مکانیکی در آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای مدل Fritsch-p5 با محفظه‌ای از جنس فولاد پرکروم با حجم ۱۲۰ میلی لیتر حاوی گلوله‌هایی به قطر ۲۰ میلی متر تحت اتمسفر آرگون انجام شد. نسبت وزنی گلوله‌ها به پودر ۱۰ به ۱ و سرعت چرخش ۳۰۰ دور بر دقیقه در آزمایشات استفاده شد. در فواصل زمانی مشخصی برای نمونه‌برداری فرایند متوقف و مقدار کمی از پودر برای مشخصه‌یابی از محفظه خارج می‌شد.

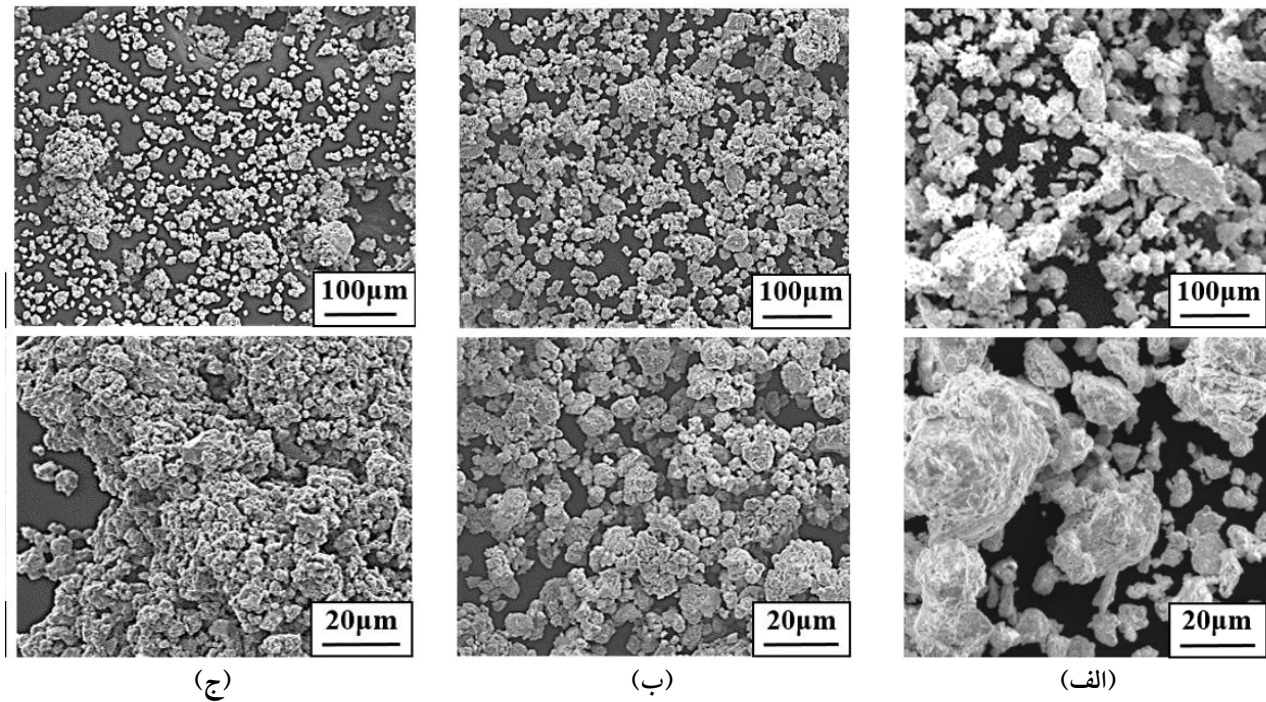
آزمایش پراش پرتو ایکس^۲ (XRD) با دستگاه Rigaku مدل D/MAX 2200 ساخت کشور ژاپن، تحت ولتاژ ۴۰ کیلوولت و شدت جریان ۳۰ میلی آمپر با استفاده از پرتو تکفام $CuK\alpha$ (۱/۵۴ آنگستروم λ) انجام شد. بررسی ساختار و مورفولوژی نمونه‌ها توسط دستگاه میکروسکوپی الکترونی روبشی Phillips XL 30 که مجهز به تجهیزات آنالیز عنصری بود، انجام شد. ساختار داخلی نمونه توسط دستگاه میکروسکوپی الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا^۳ (HRTEM) (FEI Tecnai G2 F30 S-TWIN) مورد مطالعه قرار گرفت. برای آماده‌سازی نمونه‌های میکروسکوپی الکترونی عبوری^۴ (TEM) چند میلی گرم پودر تا رسیدن به ذرات با ابعاد زیر میکرون، درون هاون ساییده شد. سپس ذرات ساییده شده درون متانول ریخته شد و به مدت ۱۵ دقیقه در دستگاه اتراسونیک قرار گرفت. پس از آن چند قطره از سوسپانسیون ایجاد شده روی نگه‌دارنده مشبک مسی ریخته شد. پس از خشک شدن، نمونه‌ها تحت ولتاژکاری ۳۰۰ کیلوولت و قدرت تفکیک ۰/۱۹ نانومتر، مورد مطالعه قرار گرفتند. به منظور کسب اطلاعات از ویژگی‌های حرارتی، آلیاژ آمورف تحت گرماسنجی

جدول ۱- مشخصات پودر اولیه

سیلیسیم	نیوبیم	نیکل	
<۵	۱۰-۵۰	<۱۰	اندازه پودر (میکرون)
>۹۹	۹۹/۸	>۹۹	خلوص (درصد)
۱۰	۳۵	۵۵	درصد اتمی
Riedel / آلمان	CBMM / برزیل	INCO / کانادا	شرکت/کشور سازنده



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مورفولوژی ذرات پودر اولیه



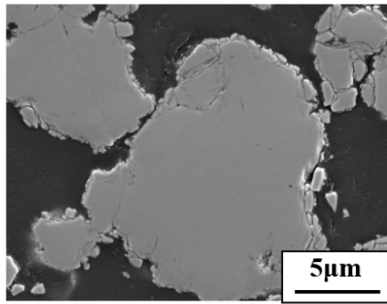
شکل ۲- مورفولوژی ذرات پودر در زمان‌های: الف) ۲، ب) ۷ و ج) ۱۲ ساعت در بزرگنمایی‌های مختلف

کف بوته از جنس Al_2O_3 قرار داده شد.

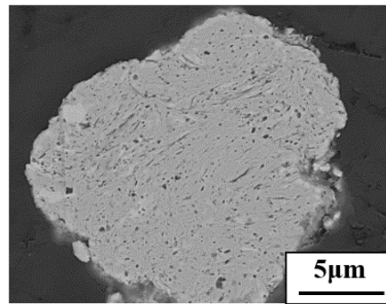
رویشی تفاضلی^۵ (DSC) قرار گرفت. آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی با دستگاه INSEIS L81 II-1550 در نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و تحت اتمسفر آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۹ انجام شد. نمونه‌های پودری به وزن ۷۰ میلی‌گرم در

۳- نتایج و بحث

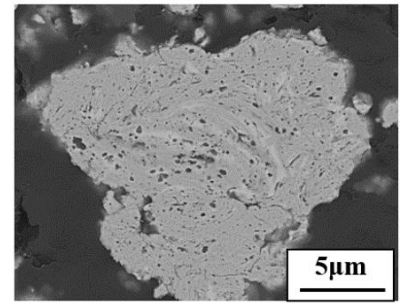
شکل (۲) مورفولوژی ذرات پودر را پس از گذشت ۲، ۷ و ۱۲



(ج)



(ب)



(الف)

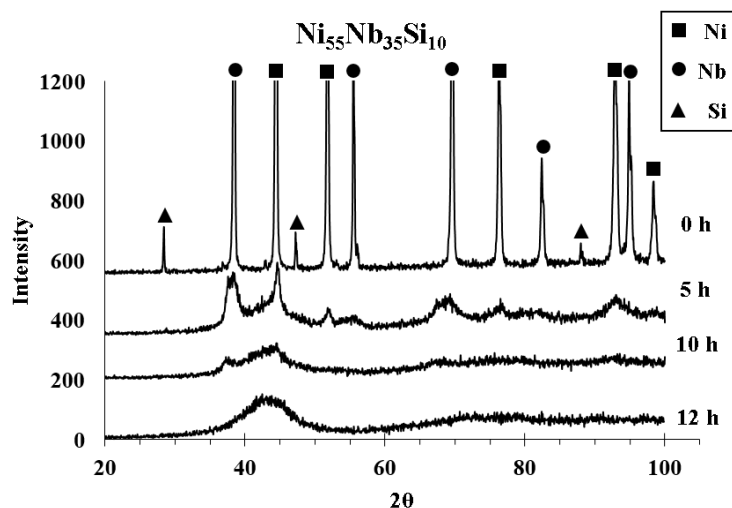
شکل ۳- مقطع ذرات پودر پس از: الف) ۵، ب) ۷ و ج) ۱۲ ساعت آلیاژسازی مکانیکی

که پس از گذشت ۱۲ ساعت می‌توان آگلومره‌هایی در حد ۱۰۰ میکرومتر درون پودر مشاهده کرد که از به هم چسبیدن ذرات با ابعاد کمتر از یک تا پنج میکرومتر تشکیل شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، اندازه و شکل ذرات با گذشت زمان آسیاکاری یکنواخت‌تر شده است. همان‌طور که در ادامه اشاره خواهد شد، این ذرات پس از ۱۲ ساعت آسیاکاری دارای ساختار آمورف هستند.

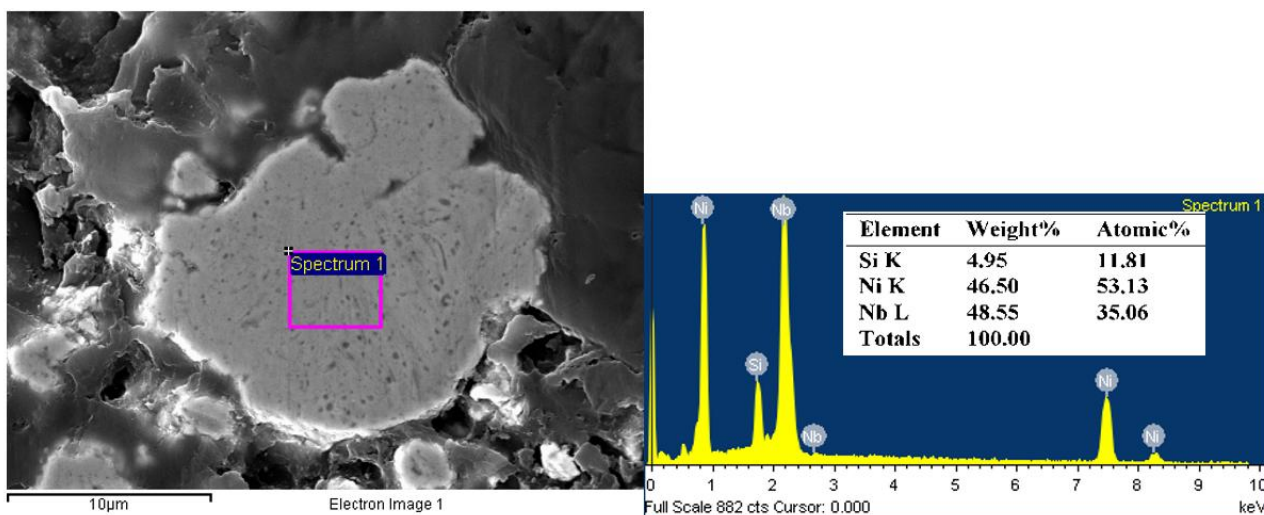
شکل (۳) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع ذرات پودر را پس از ۲، ۷ و ۱۲ ساعت آسیاکاری نشان می‌دهد. در مراحل اولیه ذرات پودر تحت نیروی فشاری ناشی از برخورد گلوله‌ها پهن شده‌اند. دو پدیده جوش سرد و شکست ذرات در طول فرایند آلیاژسازی مکانیکی به‌طور مکرر رخ می‌دهند و پس از مدتی ساختار لایه‌ای از پودر مواد اولیه به‌وجود می‌آید. ساختار لایه‌ای تشکیل شده در مراحل اولیه فرایند آلیاژسازی مکانیکی پس از زمان‌های مختلف آسیاکاری در تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی در شکل‌های (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، پس از گذشت پنج ساعت از آلیاژسازی مکانیکی لایه‌های متناوبی از پودرهای اولیه به ضخامتی در حدود یک تا دو میکرون و به‌صورت غیریکنواخت تشکیل می‌شود. با افزایش زمان آلیاژسازی مکانیکی و تکرار پدیده‌های جوش سرد و شکست ذرات پودر، لایه‌های تشکیل شده باریک‌تر و یکنواخت‌تر می‌شوند. این روند تا ایجاد ساختار کاملاً یکنواخت که پس از ۱۲ ساعت آسیاکاری در پودرها ایجاد می‌شود، ادامه

ساعت از فرایند آلیاژسازی مکانیکی نشان می‌دهد. در اثر تنش ضربه‌ای ناشی از برخورد گلوله‌ها، ذرات پودر تغییر شکل پلاستیکی داده و ذرات روی یکدیگر پهن می‌شوند. در اثر این پدیده ذرات پودر با مکانیزم جوش سرد به یکدیگر متصل می‌شوند. از سوی دیگر ذرات پودر به‌واسطه تغییر شکل پلاستیکی کار سخت شده و در معرض شکست قرار می‌گیرند. در حین آلیاژسازی مکانیکی دو فرایند اتصال ذرات پودر با مکانیزم جوش سرد و شکست ذرات به‌طور مداوم اتفاق می‌افتد. فرایند اول باعث افزایش اندازه ذرات پودر و فرایند دوم باعث کاهش اندازه ذرات می‌شود [۸ و ۹]. با مقایسه اندازه ذرات پودر اولیه (شکل ۱) و پودر آسیا شده به مدت دو ساعت (شکل ۲)، می‌توان گفت در دو ساعت اول اندازه ذرات افزایش یافته است، که نشان می‌دهد در این مرحله فرایند جوش سرد بر فرایند شکست غلبه داشته است. اندازه ذرات پس از دو ساعت آسیاکاری بین پنج تا ۶۰ میکرومتر است. با افزایش زمان آسیاکاری و ادامه فرایند آلیاژسازی مکانیکی میزان کارسختی ایجاد شده در پودرها افزایش یافته و باعث تردی آنها می‌شود. این مسئله باعث افزایش نرخ شکست ذرات در مقایسه با نرخ جوش سرد شده و کاهش اندازه ذرات را به دنبال خواهد داشت. کاهش اندازه ذرات به یک تا ۱۵ میکرومتر پس از ۷ ساعت آسیاکاری تأیید کننده این موضوع است.

با وجود کاهش اندازه ذرات در زمان‌های بیشتر فرایند آلیاژسازی مکانیکی، امکان به‌وجود آمدن آگلومره‌هایی که حاوی ذرات ریز به هم چسبیده هستند وجود دارد. به نحوی



شکل ۴- الگوی پراش پرتو ایکس آلیاژ $Ni_{55}Nb_{35}Si_{10}$ قبل و بعد از آلیاژسازی مکانیکی



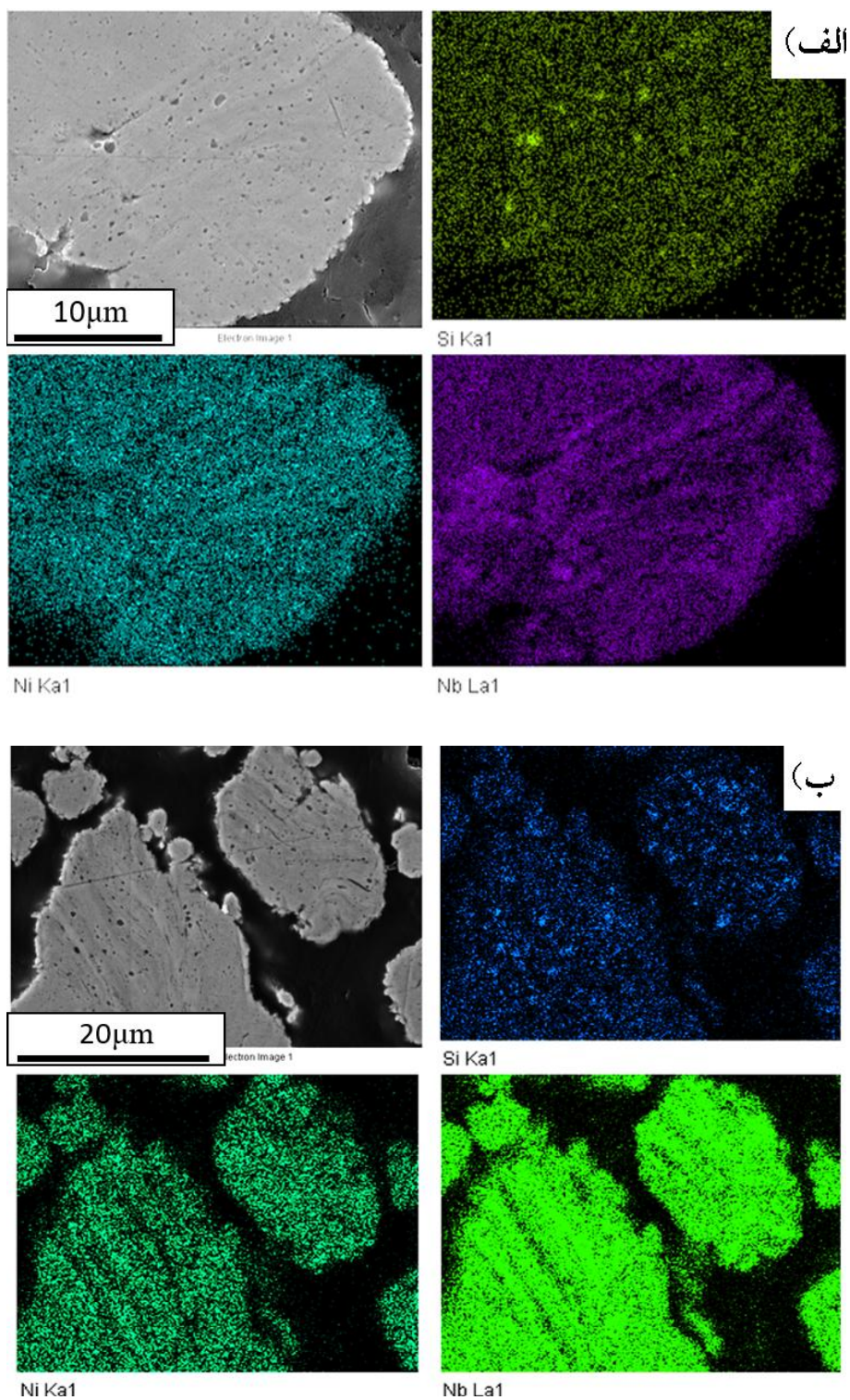
شکل ۵- آنالیز نیمه کمی طیف سنجی پراش پرتو ایکس و تصویر سطح مقطع پودر پس از ۱۰ ساعت فرایند آلیاژسازی مکانیکی

آمورف طی فرایند آسیاکاری است.

شکل (۶) نقشه توزیع عناصر درون پودر را پس از پنج و هفت ساعت آسیاکاری نشان می‌دهد. توزیع عناصر Ni, Nb و Si نیز نشان‌دهنده ساختار لایه‌ای ایجاد شده ناشی از جوش خوردن و پهن شدن پودرهای عناصر اولیه، در حین فرایند آلیاژسازی مکانیکی است. تغییرات توزیع عناصر در ساختار آلیاژ با افزایش زمان فرایند آلیاژسازی مکانیکی نشان می‌دهد فواصل بین لایه‌ها با گذشت زمان آسیاکاری کاهش یافته و توزیع عناصر در ساختار شکل یکنواخت‌تری به‌خود می‌گیرد که

می‌یابد. نتایج حاصل از الگوی پراش پرتو ایکس (شکل ۴) و عدم وجود کنتراست در ریزساختار پودرهای آسیاکاری شده به مدت ۱۲ ساعت که در شکل (۳) نشان داده شده است، بیانگر ایجاد یک فاز یکنواخت آمورف در ساختار میکروسکوپی پودر است.

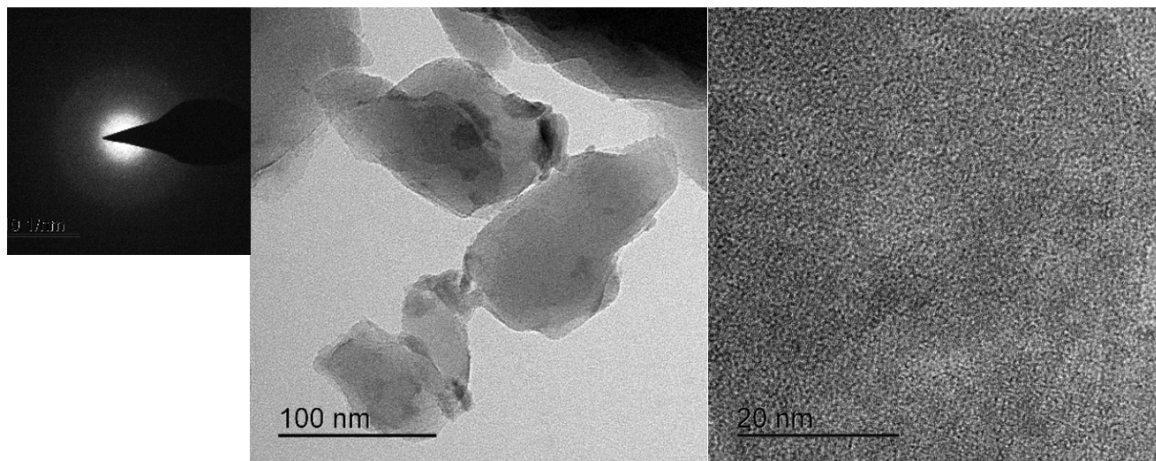
شکل (۵) آزمون نیمه کمی طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۶ (EDS) بر روی پودر آسیاکاری شده به مدت ۱۰ ساعت را نشان می‌دهد. ترکیب شیمیایی به دست آمده از آزمون طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس مشابهت زیادی با نسبت مخلوط عناصر در آغاز فرایند آسیاکاری دارد و مؤید عدم آلودگی آلیاژ



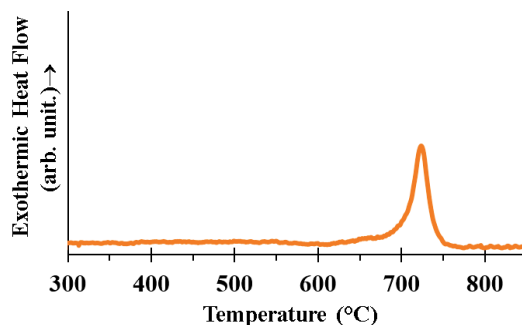
شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح مقطع و نقشه توزیع عناصر درون ذرات پودر پس از: الف) ۵ و ب) ۷ ساعت آسیاکاری

قدرت تفکیک بالا مورد مطالعه قرار گرفت. شکل‌های (۷- الف) و (۷- ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا را در بزرگنمایی‌های مختلف از ذرات پودر

در نهایت منجر به ایجاد فاز آمورف می‌شود. جزئیات بیشتر در خصوص تشکیل فاز آمورف و ساختار درونی ذرات پودر توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری با



شکل ۷- الف و ب) تصاویر میکروسکوپی الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا در بزرگنمایی‌های مختلف و ج) الگوی پراش الکترونی از ذرات پودر پس از ۱۲ ساعت آسیاکاری



شکل ۸- منحنی گرماسنجی روبشی تفاضلی آلیاژ آمورف $Ni_{55}Nb_{35}Si_{10}$ با نرخ گرم شدن 10° درجه سانتی‌گراد بر دقیقه

کریستالیزاسیون یک مرحله‌ای این آلیاژ است. دمای بالای شروع کریستالیزاسیون آلیاژ آمورف حاکی از بالا بودن پایداری حرارتی فاز آمورف در مقایسه با دیگر آلیاژهای آمورف پایه نیکل است. سیستم‌های آلیاژی آمورف مختلف بر پایه نیکل و دمای شروع کریستالیزاسیون (T_x) آنها در جدول (۲) ارائه شده است. ارتقاء پایداری حرارتی آلیاژ $Ni_{55}Nb_{35}Si_{10}$ به دلیل تأثیر عنصر شبه‌فلز Si به سیستم Ni-Nb است [۱۱].

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس و میکروسکوپی الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا نشان داد دستیابی به ساختار آمورف در آلیاژ $Ni_{55}Nb_{35}Si_{10}$ پس از انجام ۱۲ ساعت فرایند آلیاژسازی مکانیکی امکان‌پذیر است. تصاویر میکروسکوپی

پس از ۱۲ ساعت آسیاکاری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمینه کاملاً یکنواخت و ساختار دارای نظم با دامنه کوتاه است که نشان‌دهنده ساختار آمورف است. تصویر SADP^۶ نیز نشان‌دهنده حلقه گسترده‌ای فاقد نقاط نورانی است که تشکیل فاز کاملاً آمورف را تأیید می‌کند (شکل ۷-ج). این نتایج تأیید کننده نتایج حاصل از الگوی پراش پرتو ایکس است.

شکل (۸) نمودار آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی آلیاژ $Ni_{55}Nb_{35}Si_{10}$ را با نرخ گرم شدن 10° درجه سانتی‌گراد بر دقیقه نشان می‌دهد. در این منحنی وجود یک پیک گرم‌مازا که دمای شروع آن نزدیک 706° درجه سانتی‌گراد و دمای پیک آن 725° درجه سانتی‌گراد است، قابل مشاهده است. این پیک مربوط به کریستالیزاسیون فاز آمورف و نشان‌دهنده

جدول ۲- مشخصات آلیاژهای مختلف آمورف پایه نیکل

سیستم آلیاژی	Tx (درجه سانتی گراد)	فرایند	سال	مرجع
Ni-Nb	۶۶۰	آلیاژسازی مکانیکی	۲۰۰۲	[۱۲ و ۱۳]
Ni-Nb-Zr	۶۲۷	آلیاژسازی مکانیکی	۲۰۰۴	[۵]
Ni-Nb-Ti	۶۵۲	انجماد سریع	۲۰۰۵	[۱۴]
Ni-Nb-Sn	۶۶۷	آلیاژسازی مکانیکی	۲۰۰۶	[۱۵]
Ni-Nb-Ta	۶۸۸	انجماد سریع	۲۰۰۳	[۱۶]
Ni-Zr-Ti-Al-Si-Cu	۵۶۴	انجماد سریع	۲۰۱۰	[۱۷]
Ni-Nb-Si	۷۰۶	آلیاژسازی مکانیکی	۲۰۱۷	[تحقیق حاضر]

دو میکرون روی هم تشکیل شده‌اند. افزایش زمان آسیاکاری منجر به کاهش فواصل بین لایه‌ها و در نهایت ایجاد ساختار یکنواخت آمورف شد. نتایج نمودار گرماسنجی روبشی تفاضلی نشان داد کریستالیزاسیون آلیاژ آمورف $Ni_{55}Nb_{35}Si_{10}$ به صورت یک مرحله‌ای و با دمای شروع ۷۰۶ درجه سانتی‌گراد اتفاق افتاد.

الکترونی روبشی از مورفولوژی ذرات پودر نشان داد پس از گذشت دو ساعت از فرایند آلیاژسازی مکانیکی اندازه ذرات پودر افزایش یافته است، در حالی که در زمان‌های طولانی‌تر آسیاکاری کاهش اندازه ذرات پودر مشاهده شد. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع پودرها در حین فرایند آلیاژسازی مکانیکی نشان داد دو ساعت از فرایند لایه‌های متناوبی از پودرهای اولیه با ضخامتی در حدود یک تا

واژه‌نامه

1. X-ray diffraction
2. scanning electron microscope
3. high-resolution transmission electron microscope
4. transmission electron microscope
5. differential scanning calorimetry
6. electron dispersive spectroscopy
7. selected area diffraction pattern

مراجع

1. احمدی، ش. و شاهوردی، ح. ر.، "تأثیر عنصر نایوبیم بر افزایش قابلیت شیشه‌ای شدن آلیاژهای آمورف پایه آهن با ترکیب $(Fe_{55-x}Cr_{18}Mo_yB_{16}C_7Nb_x)$ ($X=0, 3, 4, 5$)"، مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۵، شماره ۲، ص ۶۷-۸۱، تابستان ۱۳۹۵.
2. بزرگمهر، م.، حسین‌زاده، م. و عسکری، م.، "ارزیابی ریزساختاری و خواص مغناطیسی آلیاژ آمورف پایه کبالت $Co_{70}B_{20}Si_5Fe_4Mo_1$ تولید شده به روش مذاب‌ریسی و آلیاژسازی مکانیکی"، مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۶، شماره ۱، ص ۱۳۱-۱۴۴، بهار ۱۳۹۶.
3. Guo, S. F., Pan, F. S., Zhang, H. J., Zhang, D. F., Wang, J. F., Miao, J., Su, C., and Zhang, C., "Fe-based Amorphous Coating for Corrosion Protection of Magnesium Alloy", *Materials and Design*, Vol. 108, pp. 624-631, 2016.
4. Sharma, S., and Suryanarayana, C., "Effect of Nb on the Glass-Forming Ability of Mechanically Alloyed Fe-Ni-Zr-B Alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 58, pp. 508-511, 2008.
5. Enayati, M. H., Schumacher, P., and Cantor, B., "Amorphization of $Ni_{60}Nb_{20}Zr_{20}$ by Mechanical Alloying", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 375-377, pp. 812-814, 2004.
6. Déo, L. P., and de Oliveira, M. F., "Accuracy of a Selection Criterion for Glass Forming Ability in the Ni-Nb-Zr System", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 615, pp. S23-S28, 2014.

7. Enayati, M. H., and Mohamed, F. A., "Application of Mechanical Alloying/Milling for Synthesis of Nanocrystalline and Amorphous Materials", *International Materials Reviews*, Vol. 59, pp. 394-416, 2014.
8. Suryanarayana, C., "Mechanical Alloying and Milling", *Progress in Materials Science*, Vol. 46, pp. 1-184, 2001.
9. عنایتی، م. ح.، مواد نانو ساختار، چاپ ۱، جهاد دانشگاهی واحد اصفهان، ۱۳۸۶.
10. Inoue, A., "Stabilization of Metallic Supercooled Liquid and Bulk Amorphous Alloys", *Acta Materialia*, Vol. 48, pp. 279-306, 2000.
11. Minouei, H., Akbari, G. H., Enayati, M. H., and Hong, S. I., "Amorphization and Nanocrystallization of Ni-Nb-Si Alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 682, pp. 396-401, 2017.
12. Schumacher, P., Enayati, M. H., and Cantor, B., "Amorphization Kinetics of Ni₆₀Nb₄₀ During Mechanical Alloying", *Materials Science Forum*, Vol. 312-314, pp. 351-356, 1999.
13. Enayati, M. H., "Crystallization Behavior of Ni-Nb Amorphous Alloys", *Scientia Iranica*, Vol. 9, pp. 157-161, 2002.
14. Shimada, T., Louzguine, D. V., Saida, J., and Inoue, A., "Thermal Stability and Devitrification Behavior of Ternary Ni-Nb-Ti and Quaternary Glassy Alloys Containing Noble Metals", *Materials Transactions*, Vol. 46, pp. 675-680, 2005.
15. Choi-Yim, H., Xu, D., Lind, M. L., Loffler, J. F., and Johnson, W. L., "Structure and Mechanical Properties of Bulk Glass-Forming Ni-Nb-Sn Alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 54, pp. 187-190, 2006.
16. Lee, M., Bae, D., Kim, W., and Kim, D., "Ni-Based Refractory Bulk Amorphous Alloys with High Thermal Stability", *Materials Transactions*, Vol. 44, pp. 2084-2087, 2003.
17. Korznikova, G., Czeppe, T., and Korznikov, A., "Structure and Properties of Ni-Based Amorphous Ribbons Consolidated by High Pressure Torsion", *Reviews on Advanced Materials Science*, Vol. 25, pp. 67-73, 2010.