

بررسی استفاده از ترکیب بین فلزی Ni_3Al برای ساخت کامپوزیتهای زمینه آلومینیومی

محمد حسین عنایتی* و مهدی صالحی**
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۳/۱۱/۲۰ - دریافت نسخه نهایی: ۸۴/۹/۲۹)

چکیده - ساخت و مشخصه‌های کامپوزیتهای زمینه آلومینیومی حاوی درصدهای حجمی مختلف ذرات ترکیب بین فلزی Ni_3Al (۴۰-۵ درصد) مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ابتدا پودر Ni_3Al با آلیاژسازی مکانیکی مخلوط پودر عناصر نیکل و آلومینیم تهیه شد. قطعات کامپوزیتی $Al-Ni_3Al$ با روش متالورژی پودر طی دو مرحله تهیه شد. ابتدا مخلوط پودرهای آلومینیوم و Ni_3Al در فشار ۵۰۰ MPa فشرده و سپس در دمای $420^\circ C$ تحت فشار ۲۵۰ MPa به مدت ۱۰ دقیقه سینتر شدند. ریزساختار و سختی قطعات کامپوزیتی با کمک روشهای پراش پرتو ایکس، میکروسکوپی الکترونی روبشی، میکروسکوپ نوری، سختی سنجی و چگالی سنجی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در قطعات کامپوزیتی تهیه شده درصد ناچیزی تخلخل وجود دارد و به علاوه توزیع ذرات فاز Ni_3Al در زمینه یکنواخت و همگن است. بررسیهای ساختاری نشان داد که در حین عملیات سینترینگ فاز جدیدی ناشی از واکنش بین Ni_3Al و زمینه آلومینیومی ایجاد نمی‌شود. قطعات کامپوزیتی تولید شده سختی بالاتری را نسبت به نمونه آلومینیم خالص داشته و میزان سختی نمونه‌ها با افزایش درصد حجمی فاز Ni_3Al افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: کامپوزیتهای زمینه آلومینیومی، $Al-Ni_3Al$ ، ترکیب بین فلزی، نانوکریستال

An Investigation of the Use of Ni_3Al Intermetallic Compound for Fabrication of Al Matrix Composites

M. H. Enayati and M. Salehi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: Fabrication and characterization of aluminum matrix composites containing different volume fractions of Ni_3Al powder (5-40 Vol%) were investigated. Ni_3Al powder was produced by mechanical alloying of elemental nickel and aluminum powder mixture. $Al-Ni_3Al$ composite parts were prepared using a powder metallurgy route involving two stages; Al and Ni_3Al powder mixtures were first compacted under 500MPa and then hot-pressed under 250MPa at $420^\circ C$ for 10min. The microstructure and hardness of consolidated parts were investigated by x-ray diffractometry, optical and scanning electron microscopy and

** - استاد

* - استادیار

hardness measurements. Results showed that consolidated Al-Ni₃Al samples included no significant porosity with a nearly uniform distribution of Ni₃Al particles. Additionally, structural examinations showed that no significant reaction between Ni₃Al and aluminum matrix occurred during sintering process. Al-Ni₃Al composites exhibited a higher hardness value compared with pure aluminum sample prepared under identical conditions. The hardness value of Al-Ni₃Al composites increased linearly as Ni₃Al content increased.

Keywords: Al matrix composites, Al-Ni₃Al, Intermetallic compound, Nanocrystalline.

۱- مقدمه

یکی از روشهای افزایش استحکام، سختی و مقاومت سایشی آلومینیم و آلیاژهای آن اضافه کردن ذرات سرامیکی به عنوان ذرات تقویت کننده در زمینه است. ترکیب شیمیایی، مقدار، اندازه، شکل و نحوه توزیع ذرات تقویت کننده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص محصول کامپوزیت نهایی می‌گذارد. در این راستا تاکنون تأثیر ذرات اکسیدی نظیر Y₂O₃ و Al₂O₃ و ذرات کاربیدی نظیر SiC و B₄C بر مشخصات مکانیکی آلومینیم و آلیاژهای آن به مقدار زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [۱-۱۱]. نکته مهم در همه این موارد این است که پیوند زمینه و ذرات تقویت کننده اغلب مطلوب نبوده و کاهش انعطاف‌پذیری و چقرمگی شکست ماده را به دنبال دارد [۱-۱۱]. لذا تحقیق در خصوص استفاده از ذرات تقویت کننده جدید و بهبود روشهای تولید ضروری است.

ترکیبات بین فلزی در سیستم Ni-Al نظیر Ni₃Al و NiAl به دلیل سختی بالا، مدول الاستیک زیاد و نقطه ذوب بالا، مواد بسیار مناسب برای تقویت آلیاژهای آلومینیم‌اند [۱۲]. در میان ترکیبات بین فلزی متعدد در سیستم Ni-Al ترکیب Ni₃Al برای این منظور مناسبتر به نظر می‌رسد. یکی از مهمترین مزیت‌های Ni₃Al به عنوان ذرات تقویت کننده این است که ضریب انبساط حرارتی این ترکیب در دمای محیط، $13 \times 10^{-6} K^{-1}$ ، بسیار نزدیک به ضریب انبساط حرارتی آلیاژهای آلومینیم، $18-24 \times 10^{-6} K^{-1}$ است. این در حالی است که ضریب انبساط حرارتی ترکیبات اکسیدی و کاربیدی تفاوت فاحشی با ضریب انبساط حرارتی آلومینیم دارند. برای مثال SiC دارای ضریب انبساط حرارتی $3/3 \times 10^{-6} K^{-1}$ است [۱۳]. این تطابق خوب بین ضرایب انبساط حرارتی باعث کاهش تنشهای پسماند در

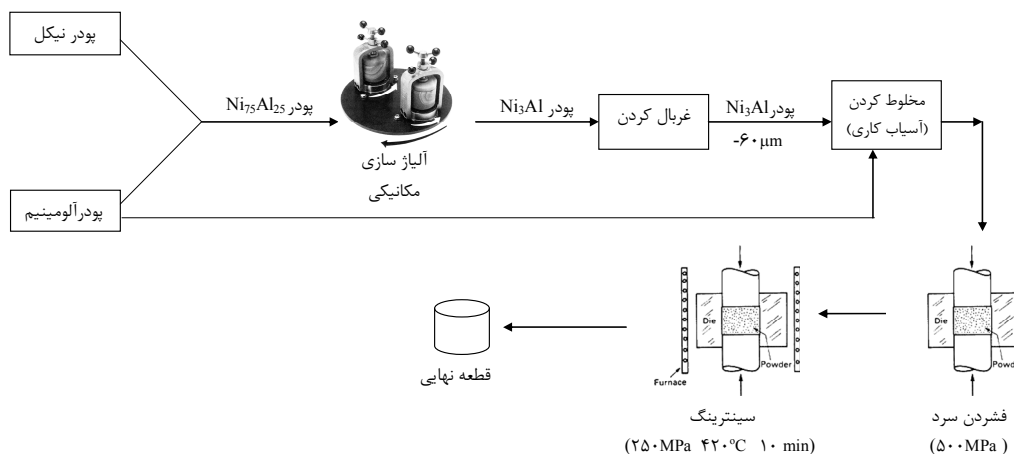
هنگام اعمال سیکلهای حرارتی و در نتیجه عدم شکست پیوند زمینه/ذرات تقویت کننده می‌شود.

در این تحقیق استفاده از پودر Ni₃Al برای ساخت کامپوزیتهای Al-Ni₃Al حاوی مقادیر مختلف Ni₃Al مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از روش آلیاژ سازی مکانیکی برای تهیه پودر Ni₃Al و روش متالورژی پودر برای ساخت قطعات کامپوزیتی Al-Ni₃Al استفاده شد.

۲- روش تحقیق

پودر آلومینیم با خلوص ۹۹/۵ درصد و پودر نیکل با خلوص ۹۹/۹ درصد به عنوان مواد اولیه به کار برده شدند. برای تهیه پودر Ni₃Al از روش آلیاژسازی مکانیکی استفاده شد. برای این منظور مخلوط پودر نیکل و آلومینیم با ترکیب Ni₇₅Al₂₅ (درصد اتمی) تهیه و در یک آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای آلیاژ سازی مکانیکی شد تا ترکیب بین فلزی Ni₃Al به وجود آید. شرایط آلیاژسازی مکانیکی در مراجع [۱۴، ۱۵] گزارش شده است.

پودر Ni₃Al به دست آمده از آلیاژ سازی مکانیکی توسط الک ۶۰ میکرون غربال و پودر عبور کرده از الک برای ساخت کامپوزیتهای Al-Ni₃Al استفاده شد. قطعات کامپوزیتی Al-Ni₃Al حاوی درصدهای حجمی متفاوت فاز Ni₃Al (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰) با روش متالورژی پودر ساخته شدند. برای این منظور ابتدا پودر Ni₃Al و پودر آلومینیم با نسبت مشخص، وزن و مخلوط شدند. شایان ذکر است که به علت اختلاف قابل ملاحظه جرم مخصوص پودرهای Ni₃Al و آلومینیم مخلوط کردن این دو پودر با روش دستی امکانپذیر نیست لذا برای تهیه مخلوطی همگن، این دو پودر در داخل آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای با سرعت چرخش ۴۰۰ rpm و نسبت



شکل ۱- مراحل تهیه نمونه‌های کامپوزیتی Al-Ni₃Al

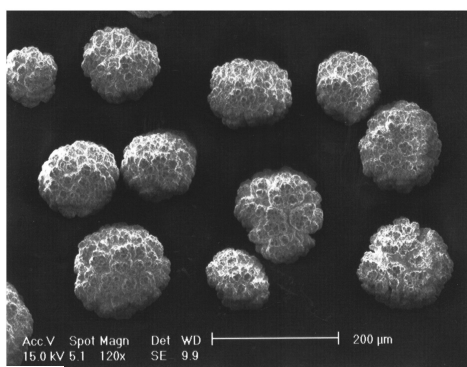
درصد تخلخل و سختی مورد مطالعه قرار گرفتند. برای مشاهده ریز ساختار و نحوه توزیع فاز Ni₃Al، نمونه‌ها توسط روش‌های متداول متالوگرافی سمباده زنی و پولیش شدند و مقطع آنها توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین ساختار داخلی نمونه‌ها قبل و بعد از سینترینگ با روش پراش پرتو ایکس (XRD) ارزیابی شد. آزمایش‌های XRD در دستگاه دیفراکتومتر فیلیپس مدل Xpert-MPD تحت ولتاژ ۴۰kV و شدت جریان ۳۰mA با استفاده از پرتوتک رنگ CuK α انجام شد. چگالی نمونه‌ها با کمک روش غوطه‌وری (روش ارشمیدس) مطابق استاندارد C-373ASTM تعیین شد. برای سختی سنجی از روش برنیل با قطر ساچمه ۲/۵mm و مقدار نیرو ۳۱/۲۵N استفاده شد. در این روش چون سطح مورد آزمایش (سطح زیر ساچمه) زیاد است لذا متوسط بهتری از سختی به دست خواهد آمد. برای هر نمونه چهار تا پنج نقطه از آن سختی سنجی شد و متوسط نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

پودر Ni₃Al با فرایند آلیاژهای مکانیکی مخلوط پودرهای نیکل و آلومینیم با ترکیب Ni₇₅Al₂₅ تهیه شد. مرفولوژی ذرات پودر آلومینیم و نیکل در شکل (۲) نشان داده شده است. اندازه ذرات پودر آلومینیم ۱۵۰-۱۰۰ میکرون و شکل ذرات آن

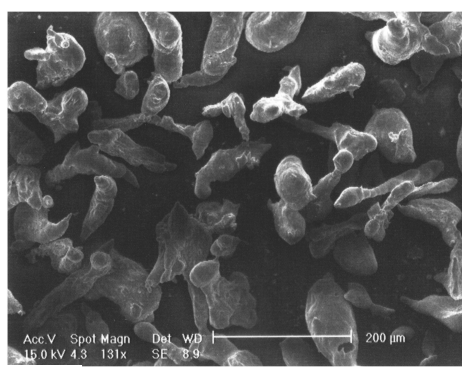
وزنی گلوله به پودر ۱:۵ به مدت زمان ۴۵ دقیقه مخلوط شدند. تهیه نمونه از مخلوط پودرهای Ni₃Al و آلومینیم در دو مرحله انجام شد. ابتدا پودر Ni₃Al و آلومینیم در داخل یک قالب استوانه‌ای فولادی با قطر داخلی ۱۰mm و قطر خارجی ۱۹mm در فشار ۵۰۰MPa به صورت سرد فشرده شد. سپس نمونه به همراه قالب به داخل یک کوره الکتریکی مجهز به دو فک هیدرولیک که در دمای ۴۲۰°C قرار داشت منتقل و به مدت ۱۰ دقیقه در فشار ۲۵۰MPa فشرده و سینتر شد. پس از پایان عملیات سینترینگ قالب و نمونه داخل آن از کوره خارج و در اتمسفر محیط به تدریج سرد شدند. اگرچه سینترینگ نمونه‌ها در اتمسفر محیط انجام شد ولیکن نتایج نشان داد که فشرده شدن پودر در مرحله اول و کوتاه بودن زمان مرحله دوم به طور موثر مانع از اکسید شدن نمونه‌ها به ویژه در قسمتهای داخلی آن می‌شود. مقدار پودر به نحوی انتخاب شد تا ارتفاع قطعه استوانه‌ای شکل نهایی حدود ۸mm باشد. در ضمن اعمال فشار به نمونه در مرحله اول و دوم به صورت تک محوری و از دو طرف انجام شد تا چگالی تا حد امکان در تمام حجم نمونه همگن و یکنواخت باشد. در شکل (۱) نحوه تهیه نمونه‌ها خلاصه شده است.

مرفولوژی ذرات پودر نیکل، آلومینیم و Ni₃Al توسط میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) فیلیپس مدل XL30 مطالعه شد. تمامی نمونه‌های سینتر شده از نظر ریز ساختار،



Ni

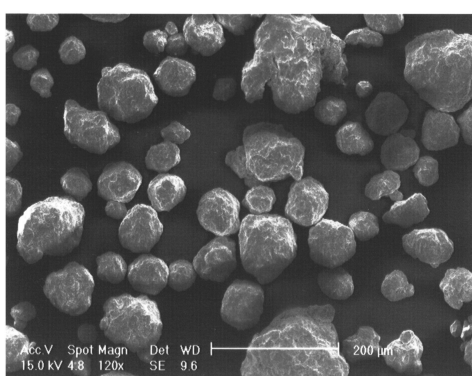
200μm



Al

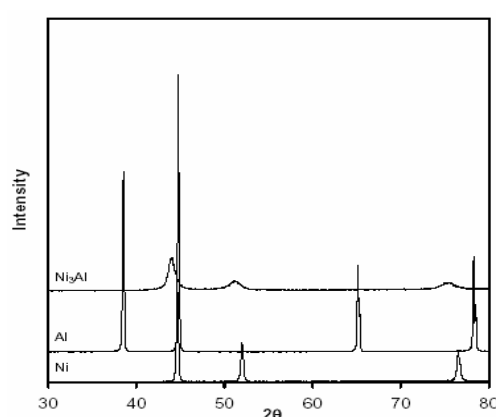
200μm

شکل ۲- مرفولوژی ذرات پودر نیکل و آلومینیم اولیه



200μm

شکل ۴- مرفولوژی ذرات پودر Ni₃Al پس از ۳۰ ساعت آلیاژ سازی مکانیکی

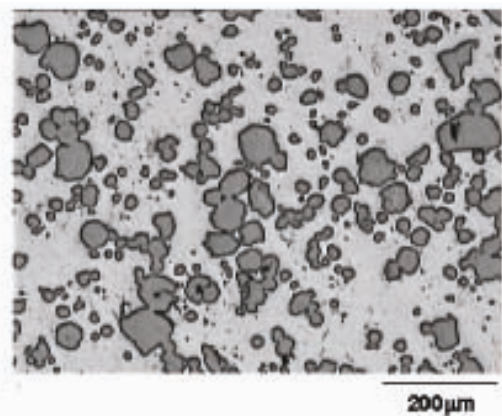


شکل ۳- الگوهای XRD از ذرات پودرهای نیکل و آلومینیم اولیه و ذرات پودر Ni₃Al پس از ۳۰ ساعت آلیاژ سازی مکانیکی

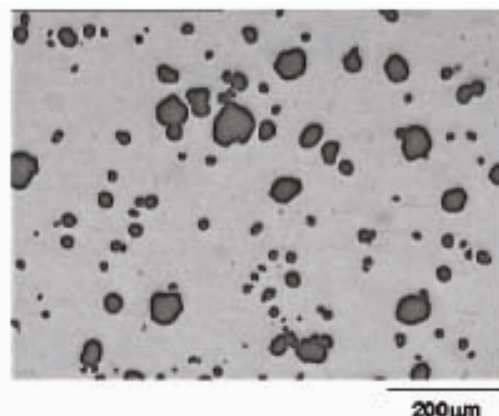
قطعات کامپوزیتهای Al-Ni₃Al طی دو مرحله (فشردن سرد و سپس سینترینگ تحت فشار) آماده شدند. شکل (۵) ریز ساختار نمونه‌های کامپوزیتی حاوی ۱۰ و ۴۰ درصد حجمی فازهای Ni₃Al را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در هر دو نمونه ذرات فاز Ni₃Al با یکنواختی مناسبی در زمینه آلومینیم پخش شده‌اند. این حالت در مورد سایر نمونه‌ها نیز مشاهده شد. در فرایند ساخت قطعات کامپوزیتی برای توزیع همگن ذرات Ni₃Al در زمینه آلومینیم مخلوط پودرهای Ni₃Al و آلومینیم توسط آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای آسیاب شدند. در حین آسیاب کاری در اثر نیروی ضربه‌ای گلوله‌ها ذرات سخت Ni₃Al در ذرات نرم پودر آلومینیم فرورفته و با تغییر شکل پلاستیکی ذرات پودر آلومینیم جوش سرد بین ذرات Ni₃Al و

کشیده و نامنظم بود. پودر نیکل ذرات کروی شکل با اندازه متوسط ۱۲۰ میکرون داشتند.

شکل (۳) الگوهای XRD از پودر اولیه نیکل، آلومینیم و محصول نهایی پس از ۳۰ ساعت آلیاژ سازی مکانیکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از ۳۰ ساعت آلیاژ سازی مکانیکی نیکل و آلومینیم در هم نفوذ کرده و ترکیب بین فلزی Ni₃Al را به وجود می‌آورند. مکانیزم تشکیل ترکیب بین فلزی Ni₃Al در حین آلیاژ سازی مکانیکی در تحقیقات قبلی [۱۴ و ۱۵] گزارش شده است. شکل (۴) مرفولوژی ذرات پودر Ni₃Al پس از ۳۰ ساعت آلیاژ سازی مکانیکی را نشان می‌دهد. ذرات پودر Ni₃Al کروی شکل بوده و اغلب ذرات آن اندازه‌ای بین ۳۰ تا ۷۰ میکرون دارند.



(ب)



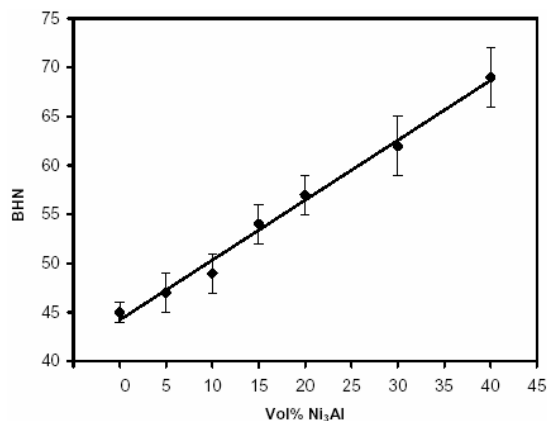
(الف)

شکل ۵- ریز ساختار قطعات کامپوزیتی Al-Ni₃Al حاوی (الف) ۱۰ و (ب) ۴۰ درصد حجمی فاز Ni₃Al

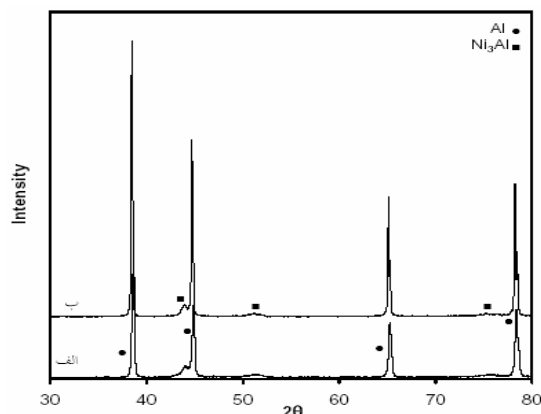
می‌کنند لذا افزایش چگالی این نواقص باعث تسریع فرایند نفوذ اتمی، که لازمه عملیات سینترینگ ذرات پودر آلومینیم است، می‌شود. به این دلیل درصد تخلخل در نمونه‌ها بسیار پایین خواهد بود.

اساساً در عملیات تولید قطعات کامپوزیتی شرایط می‌بایست به نحوه انتخاب شود تا از واکنش بین فاز تقویت کننده با زمینه و در نتیجه ایجاد فازهای نامطلوب در فصل مشترک ذرات تقویت کننده و زمینه ممانعت به عمل آید. برای بررسی این موضوع و مطالعه تغییرات ایجاد شده در ساختار داخلی قطعات کامپوزیتی Al-Ni₃Al، نمونه کامپوزیتی حاوی ۱۰ درصد حجمی فاز Ni₃Al قبل و بعد از عملیات سینترینگ مورد ارزیابی XRD قرار گرفت. شکل (۶) الگوهای XRD در این دو حالت را نشان می‌دهد. مقایسه الگوهای XRD در این شکل نشان می‌دهد که در نمونه سینتر شده هیچ پیک جدیدی تشکیل نشده است. در نمونه کامپوزیتی حاوی ۱۰ درصد حجمی فاز Ni₃Al درصد وزنی نیکل در حدود ۲۰ درصد است. بر طبق نمودار فازی تعادلی Al-Ni ساختار تعادلی این ترکیب، محلول جامد نیکل در آلومینیم و ترکیب بین فلزی Al₃Ni است. بنابراین در صورت بالا بودن زمان سینترینگ فاز Ni₃Al با زمینه آلومینیمی واکنش انجام داده و ترکیب Al₃Ni را به وجود می‌آورد که مطلوب نیست. اما در الگوهای XRD در شکل (۶) اثری از این دو فاز مشاهده نمی‌شود که نشان می‌دهد حل شدن و واکنش فاز

آلومینیم به وجود می‌آید. تکرار این فرایند باعث ایجاد مخلوط همگنی از پودرهای Ni₃Al و آلومینیم می‌شود. به این جهت در نمونه تهیه شده از این پودر ذرات Ni₃Al در زمینه توزیع یکنواخت و همگنی دارند. نکته قابل توجه در شکل (۵) این است که تخلخل قابل ملاحظه‌ای در ساختار قطعه‌های تولیدی مشاهده نمی‌شود. نتایج چگالی سنجی با روش ارشمیدس نیز عدم وجود تخلخل قابل ملاحظه در نمونه را تأیید کرد و نشان داد که چگالی نمونه‌ها در حد چگالی نظری (~۹۹٪) آنهاست. این نتایج نشان دهنده موفق بودن عملیات فشرده سازی و سینترینگ است. در حقیقت اعمال فشار بالا در دمای بالا در مرحله دوم ساخت باعث تغییر شکل پلاستیکی ذرات پودر و بسته شدن خلل و فرج و فضاهای خالی بین ذرات پودر می‌شود. به کارگیری همزمان فشار و دمای بالا همچنین باعث تسهیل فرایند سینترینگ شده و پیوستگی ذرات پودر آلومینیم در زمینه و اتصال و چسبندگی مناسب ذرات Ni₃Al با زمینه آلومینیمی را به دنبال دارد. به علاوه استفاده از عملیات آسیاب کاری برای مخلوط کردن ذرات پودر Ni₃Al و آلومینیم تغییر شکل پلاستیکی قابل ملاحظه ذرات پودر آلومینیم را در پی دارد که در اثر آن چگالی نواقص کریستالی به ویژه جاهای خالی اتمی و نابه جایها در ذرات پودر آلومینیم افزایش می‌یابد. نواقص کریستالی به عنوان مسیرهای کوتاه نفوذ اتمی عمل



شکل ۷- تغییرات سختی بر حسب درصد حجمی فاز Ni_3Al برای نمونه‌های کامپوزیتی $Al-Ni_3Al$



شکل ۶- الگوهای XRD از نمونه کامپوزیتی $Al-Ni_3Al$ حاوی ۱۰ درصد حجمی Ni_3Al (الف) قبل و (ب) بعد از عملیات سینترینگ

باعث کاهش تنشهای باقیمانده در هنگام اعمال سیکلهای حرارتی و در نتیجه عدم شکست پیوند زمینه/ذرات تقویت کننده می‌شود. سختی بالا و پایداری حرارتی ترکیب بین فلزی Ni_3Al از جمله مزایای دیگر این ماده برای کاربرد به عنوان ذرات تقویت کننده است. با توجه به این خصوصیات و همچنین جرم مخصوص پایین، کامپوزیتهای $Al-Ni_3Al$ کاربردهای زیادی برای پوشش دادن قطعات و یا ساخت قطعات و اجزای ماشین آلات می‌توانند داشته باشند.

با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که پیکهای XRD مربوط به فاز Ni_3Al کوتاه و پهن هستند که نشان دهنده ریز بودن اندازه دانه‌ها (تا حد نانومتر) و بالا بودن تنشهای الاستیک باقیمانده در ذرات پودر Ni_3Al است. نتایج تحلیلهای انجام شده بر روی ذرات پودر Ni_3Al تهیه شده با روش آلیاژسازی مکانیکی نشان می‌دهد که اندازه دانه‌های Ni_3Al در حد ۱۰ نانومتر است [۱۴]. ریز شدن اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتر منجر به افزایش قابل ملاحظه خواص مکانیکی مواد می‌شود به طوری که خواص نظیر سختی، استحکام، انعطاف پذیری و چقرمگی شکست مواد نانوکریستال چندین برابر همان مواد با ساختار میکروکریستال است [۱۶]. بنابر این انتظار می‌رود که Ni_3Al نانوکریستال علاوه بر دارا بودن استحکام و سختی بالاتر نسبت به Ni_3Al میکروکریستال از خود انعطاف پذیری و چقرمگی شکست بیشتری نیز بروز دهد. به این ترتیب اضافه کردن ذرات

Ni_3Al با زمینه به مقدار قابل ملاحظه‌ای صورت نگرفته است. همچنین بررسی شکل (۶) مشخص می‌سازد که هیچ‌گونه فاز اکسیدی مانند Al_2O_3 در حین فرایند تولید قطعات کامپوزیتی تشکیل نشده است. این نتایج نشان می‌دهد که عملیات سینترینگ به نحو مطلوبی انجام پذیرفته است.

شکل (۷) تغییرات سختی نمونه‌های کامپوزیتی $Al-Ni_3Al$ بر حسب درصد حجمی فاز Ni_3Al را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود حضور ذرات Ni_3Al در نمونه باعث افزایش سختی آن می‌شود که ناشی از سختی بالای ترکیب بین فلزی Ni_3Al است. براساس این نتایج می‌توان سختی برنیل نمونه‌های کامپوزیتی $Al-Ni_3Al$ را به صورت تابع خطی زیر بیان کرد:

$$BHN = 44 + 0.765 V$$

که در آن V درصد حجمی فاز Ni_3Al است.

سختی سنجی نمونه‌های تهیه شده در این تحقیق تنها یک ارزیابی مقدماتی و اولیه از خواص ماده کامپوزیتی ساخته شده است. بدیهی است که برای کاربردهای عملی حسب مورد می‌بایست سایر خصوصیات ماده کامپوزیتی $Al-Ni_3Al$ نظیر رفتار سایشی و خواص مکانیکی را مطالعه و ارزیابی کرد. در این ارتباط بهینه کردن شرایط تولید از نظر فشار، دما و اندازه ذرات Ni_3Al برای حصول به خواص مکانیکی مطلوب می‌بایست مدنظر قرار گیرد. همان‌طور که در مقدمه ذکر شد تطابق خوب بین ضرایب انبساط دمایی Ni_3Al و زمینه آلومینیم

Ni₃Al نانو کریستال به زمینه آلومینیم می‌تواند منجر به بهبود قابل ملاحظه مشخصات مکانیکی کامپوزیت شود. الگوهای XRD از قطعه کامپوزیت Al-Ni₃Al نشان می‌دهد، که پهنای پیک‌های XRD فاز Ni₃Al پس از عملیات سیتترینگ کاهش نیافته است. این نتایج نشان می‌دهد که در طی عملیات سیتترینگ دانه‌های Ni₃Al رشد قابل ملاحظه‌ای نداشته‌اند و ساختار نانو کریستال آن حفظ شده است. به این ترتیب خواص مطلوب Ni₃Al نانو کریستال حتی پس از عملیات سیتترینگ در ساختار محصول کامپوزیتی نهایی وجود دارد.

۴- نتیجه‌گیری

قطعات کامپوزیتی Al-Ni₃Al با مخلوط کردن پودر Ni₃Al و پودر آلومینیم به وسیله عملیات متالورژی پودر ساخته شدند. اهم نتایج به دست آمده عبارت‌اند از:
 ۱- قطعات کامپوزیتی Al-Ni₃Al تهیه شده درصد تخلخل ناچیز داشته و توزیع ذرات Ni₃Al در آن یکنواخت و همگن است.

مراجع

۲- انجام عملیات سیتترینگ باعث انجام واکنش بین فاز Ni₃Al و زمینه آلومینیمی نمی‌شود. افزایش دما و یا زمان سیتترینگ از این نظر می‌تواند مطلوب نباشد زیرا منجر به انحلال فاز Ni₃Al و کاهش درصد این فاز در ماده کامپوزیتی و همچنین ایجاد فازهای نامطلوب در فصل مشترک Ni₃Al و آلومینیم شود.

۳- قطعات کامپوزیتی Al-Ni₃Al سختی بالاتری در مقایسه با نمونه آلومینیمی خالص دارند. سختی نمونه‌ها به طور خطی با افزایش درصد حجمی فاز Ni₃Al افزایش می‌یابد به طوری که برای نمونه حاوی ۴۰ درصد حجمی Ni₃Al سختی نسبت به نمونه آلومینیم خالص بیش از ۵۰ درصد افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی اصفهان برای تأمین هزینه این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

- Miserez, A., Müller, R., Rossoll, A., Weber, L., and Mortensen A., "Particle Reinforced Metals of High Ceramic Content," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 387-389, pp. 822-831, 2004.
- Gregolin, E.N., Goldenstein, H., and Santos, R.G., "Co-Continuous Silica-Aluminum Composite," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 157-158, pp. 688-694, 2004
- Tjong, S.C., and Wang, G.S., "High-Cycle Fatigue Properties of Al-Based Composites Reinforced with In Situ TiB₂ and Al₂O₃ Particulates," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 386, pp. 48-53, 2004.
- Yang, J. B., Lin, C. B., Wang T. C., and Chu H. Y., "The Tribological Characteristics of A356.2Al Alloy/Gr_(p) composites," *Wear*, Vol. 257, pp. 941-952, 2004.
- Gul, F., and Acilar, M., "Effect of The Reinforcement Volume Fraction on The Dry Sliding Wear Behaviour of Al-10Si/SiC_p Composites Produced by Vacuum Infiltration Technique," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 1959-1970, 2004.
- Kang, Y. C., and Chan, S. L., "Tensile Properties of Nanometric Al₂O₃ Particulate-Reinforced Aluminum Matrix Composites," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 85, pp. 438-443, 2004.
- Sahin, Y., "Preparation and Some Properties of SiC Particle Reinforced Aluminium Alloy Composites", *Materials & Design*, Vol. 24, pp. 671-679, 2003.
- Zhang, Q., Wu, G., Chen, G., Jiang, L., and Luan, B., "The Thermal Expansion and Mechanical Properties of High Reinforcement Content SiCp/Al Composites Fabricated by Squeeze Casting Technology," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, pp. 1023-1027, 2003.
- Suresh, K. R., Niranjana, H. B., Jebaraj, P. M., and Chowdiah, M. P., "Tensile and Wear Properties of Aluminum Composites," *Wear*, Vol. 255, pp. 638-642, 2003.
- Sahin, Y., and Acilar, M., "Production and Properties of SiCp-Reinforced Aluminium Alloy Composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, pp. 709-718, 2003.
- Huang, Z., Yang, B., Cui, H., and Zhang, J., "Study on The Fabrication of Al Matrix Composites Strengthened by Combined In-Situ Alumina Particle and In-Situ Alloying Elements," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 351, pp. 15-22, 2003.

12. Liu, C. T., and Pope, D. P., *Intermetallic Compounds*, Vol. 2, p. 17, John Wiley, New York, 2000.
13. Brandes, E. A., and Brook, G. B., *Smithells Metals Reference Book*, 7th ed., p. 14, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1992.
14. Enayati, M. H., Sadeghia, Z., Salehi M., and Saidi A., "The Effect of Milling Parameters on The Synthesis of Ni₃Al Intermetallic Compound by Mechanical Alloying," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 375-377, pp. 809-811, 2004.
۱۵. عنایتی، م. ح.، سعیدی، ع. و صادقیان، ز.، "ساخت ترکیب بین فلزی Ni₃Al در شرایط مختلف آلیاژسازی مکانیکی"، مجله دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی، جلد ۱۵، شماره ۱، ص ۳۳-۲۳، ۱۳۸۲.
16. Suryanarayana, C., "Mechanical Alloying and Milling," *Progress in Materials Science*, Vol. 46, pp. 1-184, 2001.