

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Production of NiCrAlY nano particles by planetary milling with utilization of process control agent

Abstract

In this research production possibility of NiCrAlY nano particles by utilizing planetary milling was investigated. To reach this purpose, the commercial NiCrAlY powders with micron size were planetary milled in two processes: dry milling (without process control agent), and wet milling (with process control agent) at 1, 2, 4, and 8 h. Then they were analyzed with FE-SEM. The result shown that milling process of NiCrAlY powders in dry condition couldn't lead to NiCrAlY nano particles even in long times. But maybe the powders conversed to nanostructure NiCrAlY by this process. Whiles, with addition of 5%wt. toluene as process control agent to prevent of powder cold welding during process, the NiCrAlY nano particles could observe in primary times. Therefore, by increasing of milling time, most of powders were also conversed to nano particles.

Keywords: Nano particles, NiCrAlY, Planetary milling, Process control agent.

تولید نانوذرات NiCrAlY توسط آسیاکاری در حضور عامل کنترل کننده فرآیند

چکیده

در این پژوهش بررسی امکان تولید نانوذرات NiCrAlY از طریق فرآیند آسیاکاری بررسی شد. بدین منظور پودر NiCrAlY تجاری با ابعاد میکرونی، طی دو فرآیند آسیاکاری خشک (بدون افزودن عامل کنترل کننده فرآیند) و آسیاکاری تر (با افزودن عامل کنترل کننده فرآیند) برای زمان‌های ۱، ۲، ۴ و ۸ ساعت تحت عملیات آسیاکاری سیاره‌ای قرار گرفت. سپس تصاویر FE-SEM از آنها تهیه شد. نتایج نشان داد که فرآیند آسیاکاری پودرهای NiCrAlY در حالت خشک حتی در زمان‌های طولانی نیز نمی‌تواند منجر به تولید نانوذرات NiCrAlY گردد. بلکه ممکن است که با انجام این فرآیند، فقط پودر بصورت نانو ساختار درآید. درحالی‌که با افزودن ۵٪ وزنی تولوئن به عنوان عامل کنترل کننده فرآیند و ممانعت از جوش سرد به هنگام آسیاکاری، در همان ساعات اولیه می‌توان نانوذرات NiCrAlY را مشاهده نمود. بنابراین با افزایش زمان آسیاکاری، بخش اعظمی از پودر به نانوذرات تبدیل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات، NiCrAlY، آسیاکاری سیاره‌ای، عامل کنترل کننده فرآیند.

مقدمه

آسیاکاری یکی از روش‌های مناسب جهت تولید مواد نانوکریستال و نانوساختار می‌باشد، مواد نانوساختار به موادی اطلاق می‌شود که در یک بعد اندازه آنها کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد. اما مواد نانوکریستال موادی هستند که ساختار درونی آنها متشکل از کریستالیت‌های کمتر از ۱۰۰ نانو باشد. اگرچه ممکن است اندازه کلوخه و یا آگلومره‌های آنها در حد میکرون و یا بیشتر از آن باشد (Suryanarayana, ۲۰۰۱). با نانو شدن کریستالیت‌ها در واقع تعداد آن‌دسته از اتم‌هایی که در مرز قرار گرفته‌اند نسبت به آن‌دسته از اتم‌هایی که در حجم کریستالیت قرار گرفته‌اند افزایش می‌یابد (Schuh, ۲۰۰۳؛ William, Callister, ۲۰۰۱). آنچه در آسیاکاری اتفاق می‌افتد در واقع فرآیند پیچیده‌ای متشکل از شکست، تغییر شکل، جوش سرد و حتی نفوذ در فواصل کم می‌باشد، به همین دلیل است که از این فرآیند برای آلیاژسازی مکانیکی نیز استفاده می‌گردد.

بطور کلی این پدیده‌ها به هنگام آسیاکاری رخ می‌دهد: ۱- مخلوط و پراکنده شدن پودرها در یکدیگر، ۲- کاهش اندازه دانه و کریستالیت، ۳- به وجود آمدن کرنش و افزایش عیوب شبکه‌ای مثل نابجایی‌ها و جاهای خالی و ۴- افزایش نسبت سطح به حجم که باعث افزایش فعالیت شیمیایی و حتی نفوذ می‌گردد (Suryanarayana, ۲۰۰۱؛ El-Eskandarany, ۲۰۰۱). از انواع آسیاب‌ها برای آلیاژسازی مکانیکی و تولید مواد نانوساختار استفاده می‌گردد، که آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای یکی از آن‌ها می‌باشد. این آسیاب به خاطر نحوه طراحی فوق‌العاده‌اش، انرژی بسیار بالایی به مواد درون خود وارد می‌نماید و جزء آسیاب‌های پر انرژی محسوب می‌شود. این دستگاه دارای یک چرخ خورشیدی می‌باشد که با سرعت بسیار بالایی به چرخش در می‌آید، همزمان با دوران این چرخ خورشیدی، کاپ‌های نگهدارنده مواد بر روی چرخ خورشیدی در خلاف جهت چرخش اصلی به گردش در می‌آیند (El-Eskandarany, ۲۰۰۱؛ Stock, Cullity, ۲۰۰۱).

چند عامل مهم فرآیند آلیاژسازی مکانیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. عواملی نظیر زمان آسیاکاری، عامل کنترل کننده فرآیند^۱، سرعت چرخش محفظه و نسبت وزنی پودر به گلوله، که از این میان هر یک اثرات مختلفی را بر روی فرآیند می‌گذارند. زمان آسیاکاری یکی از پارامترهای مهم به هنگام آسیاکاری است، معمولاً زمانی را به عنوان زمان آسیاکاری انتخاب می‌کنند که حالت تعادل بین شکست و جوش سرد میان ذرات پودر بوجود آید. این زمان بسته به پارامترهای گوناگون می‌تواند متفاوت باشد، از جمله این پارامترها می‌توان به نوع آسیا، سرعت چرخش آسیا، نسبت گلوله به پودر و دمای آسیا اشاره نمود. افزایش زمان آسیاکاری علاوه بر هزینه و زمان‌بر بودن، ورود ناخواسته ناخالصی‌ها را هم به دنبال دارد. پس بنابراین مطلوب آنست که عملیات آسیاکاری تنها برای مدت زمان مورد نیاز ادامه پیدا نماید (Suryanarayana, ۲۰۰۴؛ Lu, ۱۹۹۸؛ Lu, ۲۰۰۴).

پودر $MCrAlY$ که در آن M نماینده دو عنصر نیکل، کروم و یا هر دوی آنهاست در پوشش‌های روکشی سد حرارتی کاربرد فراوان دارد (Richer, Yandouzi, Beauvais, Jodoin, ۲۰۱۰؛ Wei, Yin, Li, ۲۰۱۲؛ Ferdinando et al, ۲۰۱۰). تحقیقات متعددی از انجام عملیات مکانیکی بر روی پودرهای $MCrAlY$ توسط روش‌هایی نظیر آسیاکاری سیاره‌ای (Zhang, Jiu Li, Xin Li, Yang, ۲۰۰۸) و یا آسیاکاری تبریدی (Lui, Khodsiani, Mansuri, Mirian, ۲۰۱۳) انجام پذیرفته است.

هدف از انجام این تحقیقات پس از نانوساختار نمودن پودر $MCrAlY$ بررسی ویژگی‌هایی نظیر رفتار اکسیداسیون و ترکیب، مکانیزم رشد و یکنواختی لایه TGO در پوشش‌های لایه‌نشانی شده توسط اینگونه پودرها می‌باشد و تحقیقات نشان می‌دهد که پوشش‌های لایه‌نشانی شده با پودرهای $MCrAlY$ نانو خصوصیات برتری نسبت به پودرهای معمولی از خود نشان می‌دهند (Tang, ۲۰۰۶).

¹. Process control agent (PCA)

Ajdelsztajn, Kim, Provenzano, Schoenung, HVOF، لایه‌نشانی پودرهای MCrAlY نانو ساختار به روش‌های مختلفی نظیر APS و LPPS، VPS صورت می‌پذیرد (۲۰۱۱، Ma, Schoenung). تحقیقات نشان می‌دهد انجام عملیات مکانیکی و نانو ساختار نمودن پودرها باعث می‌گردد تا ساختار پوشش لایه‌نشانی شده حاصل از این پودرها به علت ذوب جزئی که ذرات در اینگونه فرآیندها تجربه می‌نمایند کماکان نانو باقی بماند (Ajdelsztajn, Tang, Kim, Provenzano, Schoenung, ۲۰۰۵؛ Ajdelsztajn et al, ۲۰۰۵).

روش تحقیق

در این تحقیق از پودر AMDRY962 محصول شرکت SULZER با ترکیب شیمیایی Ni-Cr21-Al10-Y1 با اندازه متوسط ۳۰-۲۰ میکرون مورد استفاده قرار گرفت. به منظور کاهش ابعاد ذرات پودر NiCrAlY از دستگاه آسیاب سیاره‌ای Fritsch استفاده شد. حجم محفظه آسیاب ۲۲۵ میلی‌لیتر و حداکثر دور آن در هر دقیقه به ۶۵۰ می‌رسد. در این تحقیق از ظرف فولاد زنگ نزن و از گلوله‌های نیکلی استفاده شد. دلیل استفاده از گلوله‌های نیکلی کاهش ناخالصی‌های وارده به پودر می‌باشد. گلوله‌های انتخابی دارای قطرهای ۷ و ۱۲ میلی‌متر با نسبت بارگیری یکسان بودند. ظرف و گلوله‌ها قبل از بارگیری به طور کامل با استون شستشو و خشک گردید و قبل از هر بار بارگیری جدید این کار تکرار می‌شد.

مقدار پودر NiCrAlY، تولوئن و گلوله‌ها به حجم محفظه آسیاب بستگی دارد و مقادیر آن بدین شرح می‌باشد: حجم تقریبی گلوله‌ها: حداکثر یک پنجم حجم ظرف، میزان بارگیری پودر: یک دهم وزن گلوله‌ها و میزان تولوئن: یک پنجم وزن پودر. این اعداد برای تحقیق حاضر عبارتند از: ۵۰۰ گرم گلوله، ۵۰ گرم پودر NiCrAlY و ۱۰ گرم تولوئن. سرعت چرخش محفظه ۴۵۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. در اثر ضربات دائمی که گلوله‌ها بر همدیگر و به جداره ظرف وارد می‌کنند، دما به شدت بالا می‌رود بطوریکه امکان ادامه فرآیند بیش از یک ساعت وجود ندارد، در غیر اینصورت فشار بخار تولوئن باعث خروج واشر محافظ درب محفظه می‌گردد و ممکن است خطر آفرین نیز باشد. برای رفع این مشکل بعد از هر ۳۰ دقیقه آسیاکاری در فرآیند تر (همراه با تولوئن) و هر یک ساعت آسیاکاری در فرآیند خشک (بدون تولوئن) کاپ را از آسیاب خارج نموده و آن را خنک می‌نماییم. در نهایت نتایج پس از تصویربرداری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۱ (FESEM) ساخت شرکت ZEISS مدل SIGMA-VP به منظور رویت ذرات نانو استفاده گردید.

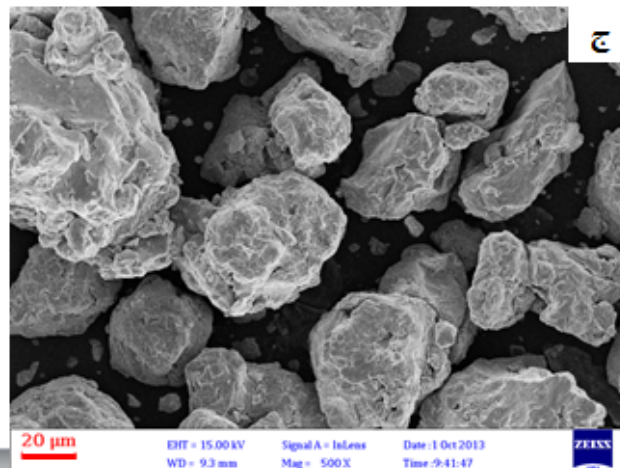
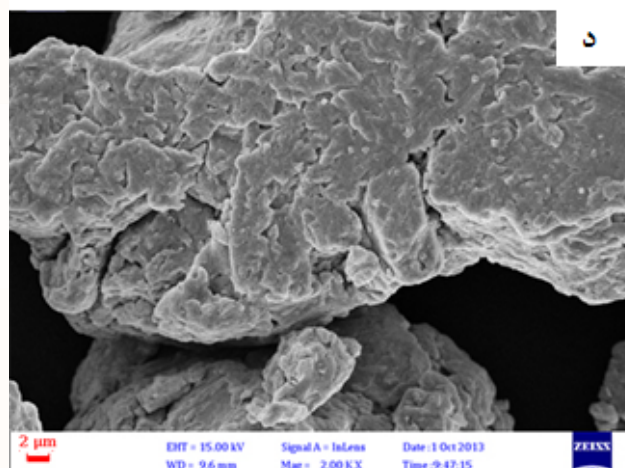
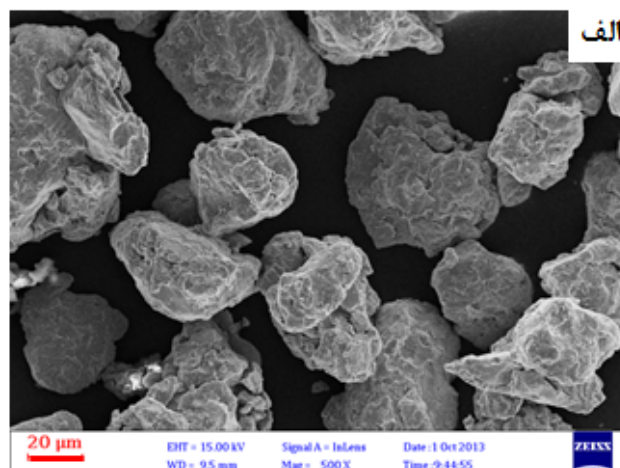
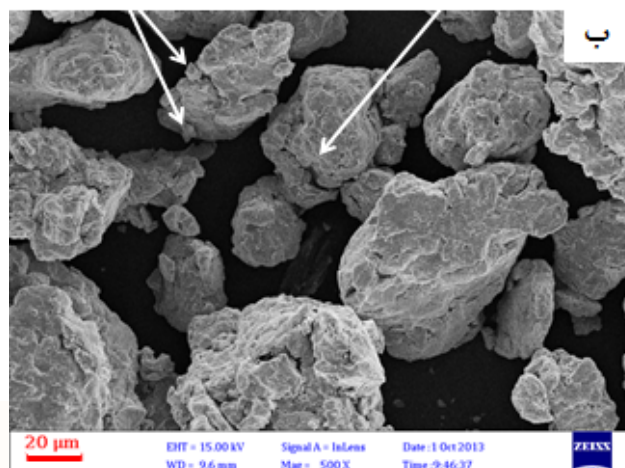
نتایج و بحث

در شکل ۱ تصاویر پودرهای آسیاب شده در محیط خشک و در زمان‌های مختلف یک، چهار و هشت ساعت نشان داده شده است.

¹. Field Emission-SEM (FE-SEM)

ذرات ریز مستعد
جوش خوردن

ترک خوردن ذرات



شکل ۱- آسیابکاری پودر NiCrAlY در محیط خشک برای زمان‌های مختلف: الف) ۱ ساعت، ب) ۴ ساعت، ج) ۸ ساعت، د) بزرگنمایی بیشتر از ج.

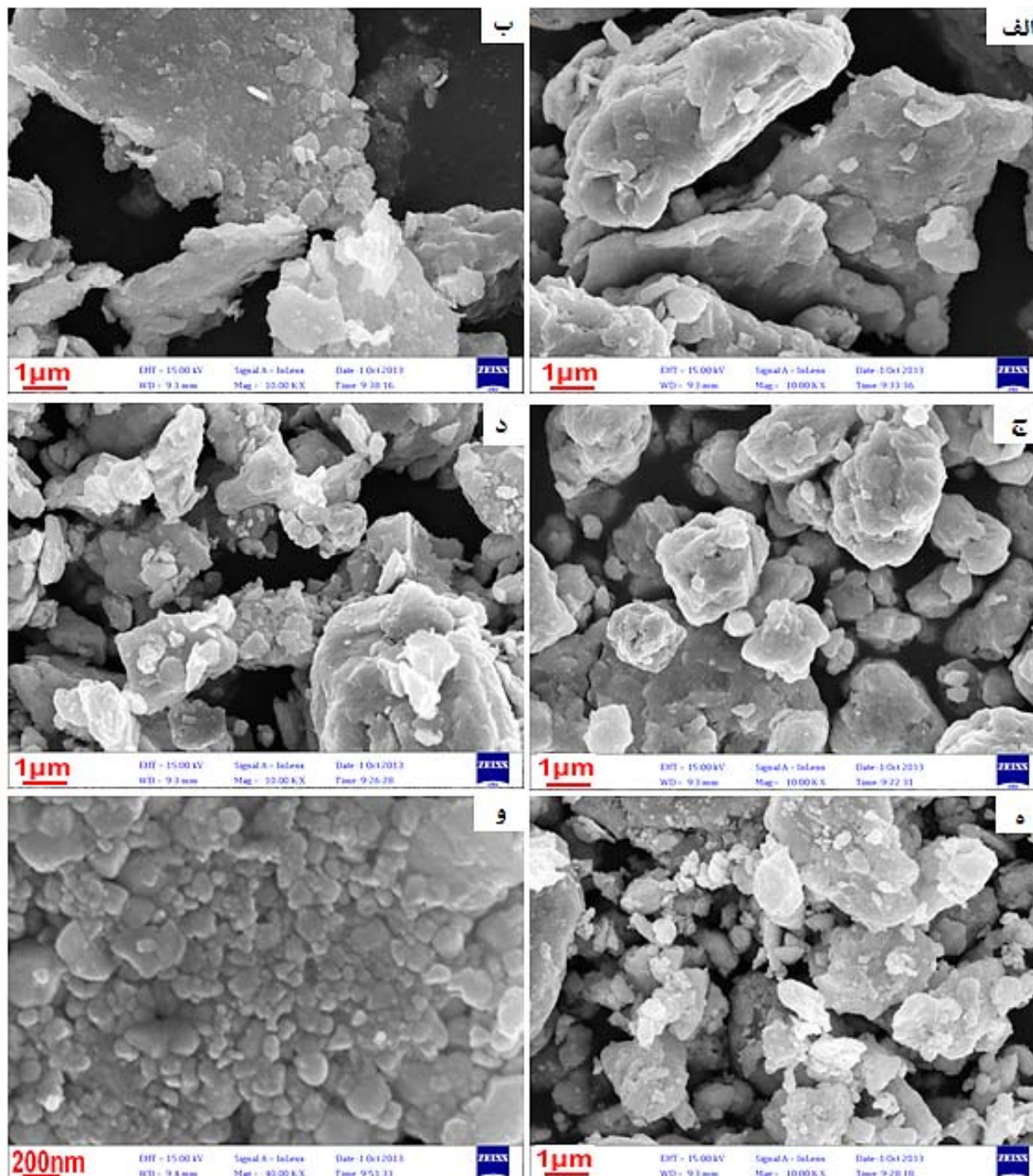
همانطور که در شکل پیداست پس از هشت ساعت آسیابکاری نسبت به پودر اولیه تغییر محسوسی در اندازه کلوخه‌های پودرها ایجاد نشده است، اغلب کلوخه‌ها در ساعات اولیه در حدود ۲۰-۴۰ میکرون بوده و پس از ۸ ساعت آسیابکاری اندازه آن‌ها تقریباً در همین محدوده مانده است. و تنها تعداد کلوخه‌های در حدود ۲۰ میکرون افزایش پیدا کرده است. مقادیر بسیار اندکی از ذرات در حد یک تا پنج میکرون پس از چهار ساعت آسیابکاری به وجود آمده است. این ذرات پس از هشت ساعت آسیابکاری اندکی افزایش پیدا کرده ولی کماکان مقدار آن‌ها بسیار اندک به نظر می‌رسد (شکل ۱ ج).

اگر در بزرگنمایی بیشتر بر روی سطح یکی از ذرات دقت شود، مشاهده می‌شود سطح آگلومره‌های NiCrAlY بر اثر ضربات شدید دچار تغییر فرم‌های شدیدی شده است و تعداد بسیار اندکی ذرات زیر میکرونی بر روی سطح هم دیده می‌شود. به نظر می‌رسد با توجه به خشک بودن محیط فرآیند، آسیابکاری تنها منجر به تغییر شکل شدید در سطح ذرات اصلی و ایجاد نابجایی در آن‌ها می‌شود و اگر

هم بر اثر ضربات متعدد پودرها خُرد شوند، در مراحل بعدی همین پودرهای خرد شده مستعد آن هستند که در ادامه فرآیند آسیاکاری با یک ضربه شدید، دوباره به ذرات بزرگتر چسبیده و یا حتی جوش بخورند (شکل ۱-ب) (El-Eskandarany, ۲۰۰۱؛ Stock, Cullity). از شکل‌ها می‌توان به مکانیزم حاکم بر آسیاکاری که همان ترک خوردن، خُرد شدن و جوش خوردن است پی برد. گرچه بر طبق تحقیقات گذشته می‌توان به‌طور حتم مطمئن بود که ساختار چنین پودری نانو است، اما چنین فرآیندی حتی در صورت ادامه به مدت زمان‌های طولانی‌تر نمی‌تواند منجر به تولید نانوذرات پودر NiCrAlY گردد.

شکل ۲ تصاویر ریزساختاری از آسیاکاری پودرهای NiCrAlY میکرونی برای ساعات مختلف در محیط حاوی تولوئن را نشان می‌دهد. چنانچه مشهود است با مرطوب کردن محیط آسیاب توسط یک عامل کنترل کننده فرآیند نظیر تولوئن یا الکل وضعیت آسیاکاری بسیار متفاوت به نظر می‌رسد، پس از افزودن تولوئن به مخلوط پودر و گلوله، عامل کنترل کننده فرآیند (تولوئن) بر روی سطح ذرات پودر جذب شده و جوش سرد بین ذرات پودر را به حداقل می‌رساند و بدین وسیله باعث جلوگیری از کلوخه شدن ذرات می‌شود. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود اولین تغییر جدی در شکل ظاهری پودرها در همان ساعت اول بوجود می‌آید. ذرات حدوداً ۵۰ میکرونی به ورقه‌هایی در حدود ۱۰-۵ میکرون تبدیل می‌شوند، نکته قابل توجه ضخامت این ورقه‌ها می‌باشد. ضخامت این ورقه‌ها کمتر از یک میکرون می‌باشد و حتی ضخامت برخی از آنها در حد ۱۰۰ نانو است. (شکل ۲-الف) گزارشاتی از سایر محققین مبنی بر بدست آمدن ذرات ورقه مانند در اثر فرآیند آسیاب تبریدی وجود دارد (Khodsiani et al ۲۰۱۳؛ Tang et al ۲۰۰۶).

در ساعات اولیه آسیاکاری در همان یک ساعت اول ذرات نانو در کنار ذرات میکرونی حضور پیدا می‌کنند. حضور این ذرات را می‌توان بخوبی بر سطح ذرات بزرگتر مشاهده نمود (شکل ۲-ب). پس از افزایش زمان آسیاکاری از یک ساعت به ۲ و ۴ ساعت، ذرات حالت ورقه‌ای خود را از دست می‌دهند و به حالت کروی و یا بیضی درمی‌آیند، احتمال می‌رود تغییرات در میزان عامل کنترل کننده فرآیند باعث چنین تغییر شکل محسوسی شده باشد. کماکان می‌توان حضور ذرات در حد نانو را در سطح ذرات مشاهده نمود، افزایش این ذرات با افزایش زمان آسیاکاری به ۴ ساعت و مخصوصاً ۸ ساعت کاملاً آشکار است. پس از ۸ ساعت آسیاکاری به وضوح می‌توان ذرات فراوان نانو را بر سطح کلوخه‌ها و یا آگلومره‌هایی که از چسبیدن ذرات نانو بهم بوجود آمده‌اند را مشاهده کرد. ضمن آن‌که ذرات منفرد نانو به مراتب افزایش پیدا کرده‌اند، بطوریکه در ازای هر ذره در حد میکرون صدها و شاید هزاران نانوذره قابل مشاهده است (شکل ۲). این امر برخلاف گزارشات برخی از محققین برای دستیابی به نانو ذرات از طریق فرآیند آسیاکاری است، چرا که در این گزارشات زمان‌های بسیار طولانی ۵۰ تا ۱۰۰ ساعت آسیاکاری را برای دستیابی به ذرات اعلام نموده‌اند. این در حالی است که تصاویر نشان می‌دهند که در همان ساعات اولیه ذرات نانو ظاهر می‌شوند.



شکل ۲- آسیاکاری پودر NiCrAlY در محیط مرطوب برای زمان‌های مختلف: (الف) ۵+ ساعت، (ب) ۱ ساعت، (ج) ۲ ساعت (د) ۴ ساعت (ه) ۸ ساعت و (هـ) بزرگنمایی بیشتر از (هـ)

در بزرگنمایی‌های بالاتر از پودر هشت ساعت آسیاب شده ذرات نانو یا به صورت منفرد و یا به صورت چسبیده بر روی سطح ذرات بزرگتر به خوبی قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد سطح تمامی کلوخه‌ها شامل ذرات بسیار ریز نانویی است که در اثر وارد شدن ضربات مکانیکی گلوله‌ها به سطح کلوخه جوش خورده است. حتی به احتمال فراوان این امکان وجود دارد که داخل هر یک از کلوخه‌های میکرونی مملو از پودرهای نانویی باشد که در فعل و انفعالات آسیاکاری بدام افتاده‌اند. مسلماً کلوخه‌ای که این پودرهای نانو به آن جوش خورده است برخلاف حالت خشک مرزانه اصلی تشکیل می‌دهد.

اگرچه کلیه ذرات پودر نهایی به حد مقیاس نانو نرسیده باشد، اما تعداد ذرات نانو در آن به قدری بالاست که اطلاق نام نانوذرات NiCrAlY را برای آن قابل قبول می‌نمایند. مقایسه اشکال حاصل از فرآیند تر و فرآیند خشک به خوبی این مطلب را می‌رساند که پودرهای حاصل از فرآیند تر به سبب سطوح آزاد بیشتر نسبت به فرآیند خشک از مسیرهای بهتری برای نفوذ عناصری مانند آلومینیوم برخوردار است.

شاید بتوان تفاوت در میان پودرهای NiCrAlY نانو ساختار و نانوذرات NiCrAlY را تفاوت در مسیرهای نفوذ این دو نوع پودر دانست. پودرهای نانو ساختار پودرهایی هستند که چگالی نابجایی در آن‌ها به شدت افزایش یافته است، تاحدی که نابجایی‌ها موفق به تشکیل مرزهای کم زاویه و مرزانه‌های فرعی می‌شوند. چنین پودری بعد از پاشش و قرارگرفتن در معرض دمای بسیار بالای پاشش‌های حرارتی حتی در صورت ذوب نشدن، مستعد آن است که با بازآرایی نابجایی‌های خود و یا رشد دانه، بخشی از ساختار نانویی خود را از دست بدهد. در حالی که مرزهای موجود در یک پودر نانو مرزهای اصلی بوده و چنین مرزهایی مسیرهای بسیار سریع و ساده‌تری نسبت به مرزانه‌های فرعی برای نفوذ هستند و بعد از پاشش حتی اگر بخش اعظم پودرهای نانوذرات NiCrAlY در اثر ذوب و انجماد مجدد که جزء خصایص پاشش‌های حرارتی است، خاصیت نانویی خود را از دست بدهند، بخشی از پودرهای نانو باقی مانده و یا ساختارهای نانویی ایجاد شده از ذوب و انجماد مجدد ذرات نانو، مسیرهای نفوذ بسیار سریع و مناسبی را برای عناصری مانند Al و Cr در اختیار ساختار قرار خواهند داد. به موارد مطرح شده بایستی استحکام و سختی بالاتر پوشش‌های نانویی یا پوشش‌هایی که دارای اندازه دانه‌های زیرمیکرونی‌اند را نسبت به پوشش‌های میکرونی اضافه کرد.

از معایب روش آسیاکاری می‌توان به ورود ناخالصی‌ها اشاره کرد (Tang et al, ۲۰۰۶). مشکل بعدی آگلومره کردن پودرهایی است که به سائزهای زیرمیکرونی و نانو رسیده‌اند. بایستی سائز و وزن پودرها به گونه‌ای باشد که جهت پاشش پلاسمایی مناسب باشد. زیاد بودن حجم تولوئن، کمکی به فرآیند آسیاکاری نمی‌کند و می‌تواند منجر به دو اتفاق نامطلوب گردد، اول آنکه حرکت گلوله‌ها که عامل اصلی خرد کردن ذرات می‌باشند طبیعتاً در محیط مایع کندتر شده و محیط مایع باعث کاهش انرژی گلوله‌ها می‌شود. دوم آنکه حجم زیاد تولوئن پس از بالا رفتن دمای آسیاب بخار بیشتری ایجاد می‌کند و فشار زیاد بخار تولوئن می‌تواند منجر به بروز حادثه شود.

نتیجه‌گیری

۱) فرآیند آسیاکاری پر انرژی پودر MCrAlY بدون حضور عامل کنترل کننده فرآیند در زمان‌های ۸ ساعت نمی‌تواند منجر به تولید نانو پودر MCrAlY گردد و تنها با ضربات دائم مکانیکی در اثر افزایش تعداد نابجایی‌ها این امکان وجود دارد که به پودر MCrAlY نانو ساختار دست پیدا کرد. اندازه کلوخه‌ها هنگام انجام این فرآیند تغییر چندانی نمی‌کند و تنها شکل ظاهری آنها از کروی به کلوخه‌ای تغییر پیدا می‌کند.

۲) فرآیند آسیاکاری پر انرژی پودر MCrAlY با حضور عامل کنترل کننده فرآیند رفتار متفاوتی نسبت به حالت قبل، از خود نشان می‌دهد و در همان زمان‌های اولیه آسیاکاری می‌توان شاهد حضور نانوذرات MCrAlY بر روی سطح کلوخه‌ها بود. تعداد این نانوذرات با افزایش زمان آسیاکاری افزایش پیدا می‌کند به طوریکه تصاویر FE-SEM نشان می‌دهد پس از گذشت تنها ۸ ساعت تعداد فراوانی از ذرات نانو به صورت مستقل و یا به صورت چسبیده بر سطح ذرات زیرمیکرونی بوجود خواهند آمد و سائز اغلب این ذرات زیر ۱۰۰ میکرون می‌باشد.

منابع

- Ajdelsztajn, L., Picas, J.A., Kim, G.E., Bastian, G.E., Schoenung, L., & Provenzano, V. (2002). "Oxidation behavior of HVOF sprayed nanocrystalline NiCrAlY powder". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 338, Pp. 33-43.
- Ajdelsztajn, L., Tang, F., Kim, G.E., Provenzano, V., & Schoenung, J.M. (2005). "Synthesis and oxidation behavior of nanocrystalline MCrAlY bond coatings". *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 14, Pp. 23-30.
- El-Eskandarany, M.S. (2001). "Mechanical alloying for fabrication of advanced engineering materials". USA, *Noyes Publications*, Pp.138-142.
- Ferdinando, M.D., Fossati, A., Lavacchi, A., Bardi, U., Borgioli, F., Borri, C., Giolli, C., & Scrivani, A. (2010). "Isothermal oxidation resistance comparison between air plasma sprayed, vacuum plasma sprayed and high velocity oxygen fuel sprayed CoNiCrAlY bond coats". *Surface & Coatings Technology*, Vol. 204, Pp. 2499-2503.
- Khodsiani, Z., Mansuri, H., & Mirian, T. (2013). "The effect of cryomilling on the morphology and particle size distribution of the NiCoCrAlSi powders with and without nano-sized alumina". *Powder Technology*, Vol. 245, Pp. 7-12.
- Lu, L., & Lai, M.O. (1998). "Mechanical alloying". USA, *Springer*, Pp. 327-342.
- Ma, K., & Schoenung, J.M. (2001). "Isothermal oxidation behavior of cryomilled NiCrAlY bond coat: homogeneity and growth rate of TGO". *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, Pp. 5178-5185.
- Richer, P., Yandouzi, M., Beauvais, L., & Jodoin, B. (2010). "Oxidation behaviour of CoNiCrAlY bond coats produced by plasma, HVOF and cold gas dynamic spraying". *Surface & Coatings Technology*, Vol. 204, Pp. 3962-3974.
- Schuh, C.A. (2003). "Hardness and abrasion resistance of nanocrystalline nickel alloys near the Hall-Petch breakdown regime". *DTIC Document*
- Suryanarayana, C. (2001). "Mechanical alloying and milling". *Progress in Materials Science*, Vol. 46, Pp. 1-184.
- Suryanarayana, C. (2004). "Mechanical alloying and milling". New York, *Marcel Dekker*, Pp. 15-32.
- Tang, F., Ajdelsztajn, L., Kim, G.E., Provenzano, V., & Schoenung, J.M. (2006). "Effects of variations in coating materials and process conditions on the thermal cycle properties of NiCrAlY/YSZ thermal barrier coatings", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 425, Pp. 94-106.
- Wei, Q., Yin, Z., & Li, H. (2012). "Oxidation control in plasma spraying NiCrCoAlY coating". *Applied Surface Science*, Vol. 258, Pp. 5094-5099.
- William, J., & Callister, D. (2003). "Fundamentals of materials science and engineering". USA, *John Wiley & Sons*, Pp. 64-78.
- Zhang, Q., Chang, J.L., Cheng, X.L., Guan, J.Y., & Siu, C.L., (2008). "Study of oxidation behavior of nanostructured NiCrAlY bond coatings deposited by cold spraying". *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, Pp. 3378-3384.