

Research Paper

Mechanical Milling of Aluminum Chips, 3000 and 5000 series

Narmin Malekpour¹, *Maziyar Azadbeh²

1- M.Sc. Student, Department of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2- Professor, Department of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Citation: Malekpour N, Azadbeh M. Mechanical Milling of Aluminum Chips, 3000 and 5000 series. Metallurgical Engineering 2018; 20(4): 270-282 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.49941.1099>

doi : <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.49941.1099>

ABSTRACT

In this study, the solid state recycling of aluminum waste (3000 and 5000 series) through mechanical milling, leads to production of nano-crystalline aluminum powders. For this goal, aluminium used beverage cans, which usually consist of body (75%), lid (22%) and opening part (3%), are used as raw material. The body, lid and opening of cans usually are alloyed 3004, 5182 and series of 5017, 5042 or 5082, respectively. After two-steps hammer milling of cans, fine chips with 10 mm in size was achieved. The de-coating and chemical cleaning operations were performed to remove the paint layer and other contaminations (such as oil and oxides), respectively. The ball milling was accomplished on clean aluminum fine chips in a planetary ball mill under argon atmosphere for various times up to 48h. The results show that the short time would not be enough for milling. On the other hand too long times are unwelcome either, apparently as a consequence of microstructure leads to agglomeration. Therefore there is an optimum time for this process. In the case of process controlling agent, however it leads to finer powder production, it contaminates the final product due to decomposition during milling. Since mechanical milling without PCA would be suitable. Totally, at least for the condition used in this investigation, 24h mechanical milling without PCA for production clean nano crystalline Al powders finer than 50nm in crystalline size with uniform size (smaller than 40 μm) will be recommended.

Keywords: 3000 and 5000 aluminum alloy scraps, solid state recycling, ball milling, nano crystalline Al powders.

■ ■

* *Corresponding Author:*

Maziyar Azadbeh, PhD.

Address: Department of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Tel: +98 (41) 35414502

E-mail: azadbeh@sut.ac.ir

آسیاکاری مکانیکی چیپس‌های آلومینیم سری ۳۰۰۰، ۵۰۰۰ و تولید پودر نانوکریستالی

نرمین ملک پور^{۱*}، مازیار آزادبه^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران.

چکیده

هدف از این تحقیق، بازیافت حالت جامد ضایعات آلومینیم سری ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ از طریق آسیاکاری مکانیکی است؛ به طوری که منجر به تولید پودر آلومینیمی نانوکریستالی شود. بدین منظور ضایعات قوطی آلومینیمی مستعمل نوشیدنی که معمولاً از سه قسمت بدنه، سر و بازشونده تشکیل شده و به ترتیب ۲۲، ۷۵ و ۳ درصد از وزن کل قوطی را تشکیل می‌دهند، به عنوان ماده‌ی اولیه استفاده می‌شود. بدنه قوطی معمولاً آلیاژ ۳۰۰۴ و سر آن از نوع ۵۱۸۲ و قسمت بازشونده از سری آلیاژهای ۵۰۱۷، ۵۰۴۲ یا ۵۰۸۲ می‌باشند. قوطی مستعمل آلومینیمی نوشیدنی‌ها بعد از دو مرحله آسیاکاری چکشی به چیپس‌هایی با اندازه ۵۰ میلی‌متر و نهایتاً ۱۰ میلی‌متر تبدیل می‌شوند. سپس عملیات رنگ‌زدایی و شستشوی شیمیایی (روغن و اکسیدزدایی) صورت می‌گیرد. متعاقباً چیپس‌های تمیزکاری شده به طریق مکانیکی و با استفاده از گلوله‌های مقاوم به سایش در دستگاه آسیای سیاره‌ای تحت اتمسفر محافظ آرگون در مدت زمان‌های مختلف تا ۴۸ ساعت، به ذرات پودری تبدیل می‌شوند. نتایج نشان داد که آسیاکاری در زمان‌های کوتاه به طور کامل انجام نشده و در زمان‌های طولانی آگلومراسیون اتفاق می‌افتد. بنابراین زمان بهینه‌ای برای دستیابی به پودر ریز دانه وجود دارد. از طرفی استفاده از عامل کنترل کننده هر چند که باعث ریز شدن بیشتر پودر می‌شود ولی به دلیل تجزیه شدن آن و ایجاد آلودگی چندان مناسب نیست. به طور کلی در این تحقیق، آسیاکاری چیپس آلومینیمی به مدت زمان ۲۴ ساعت بدون هیچ عامل کنترل کننده‌ی فرایند، منجر به تولید پودر با اندازه کوچک‌تر از ۴۰ میکرومتر با توزیع یکنواخت و اندازه کریستالیت ۲۱/۶۴ نانومتر، با آلودگی و اکسیداسیون ناچیز می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: ضایعات آلومینیم آلیاژ ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰، بازیافت حالت جامد، آسیاکاری مکانیکی، پودر نانوکریستالی آلومینیم.

۱. مقدمه

در اواخر ۱۹۲۰ تولید پودر آلومینیم توسط هال^۱ صورت گرفته است. در آن زمان دو پیشرفت مهم در زمینه تولید پودر آلومینیم مطرح گردید که اولی در مورد گسترش فرایند آسیاکاری با ایمنی بالا بود و امروزه نیز برای تولید پودر ورقه‌ای شکل استفاده می‌شود. پیشرفت دوم معرفی فرایند اتمیزاسیون، که منجر به تولید پودر اتمیزه شد و امروزه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی از آنجایی که پودر آلومینیم، مخلوط انفجاری با هوا تشکیل می‌دهد، در کارخانجات اتمیزاسیون (آبی و یا گازی) برای تولید پودر آلومینیم خطر انفجار وجود دارد [۱۴]. با توجه به این موضوع روش پیشنهادی اول در مقایسه با دیگری از ایمنی بیشتری برخوردار است.

آسیاکاری مکانیکی در بازیافت حالت جامد برخی منابع آلومینیمی و تبدیل آن به پودر می‌تواند نقش مهمی داشته باشد. شرافت^۲ و همکارانش براده‌های آلومینیمی حاصل از

امروزه مزایای بازیافت آلومینیم به عنوان ماده‌ای که ۱۰۰٪ قابل بازیافت می‌باشد، توسط محققان مهم تلقی می‌شود [۱]. در بین روش‌های مختلف، بازیافت حالت جامد در مقایسه با بازیافت متداول (ذوب مجدد) انرژی کمتری نیاز داشته و حفاظت از محیط زیست نیز در آن روش سهل‌تر است [۲-۶]. بازیافت حالت جامد ضایعات آلومینیمی می‌تواند از طریق اکستروژن سرد یا گرم ماده اولیه عاری از آلودگی برای تولید پروفیل، نورد برای ساخت ورق، و آسیاکاری مکانیکی برای تولید پودر انجام شود [۷-۱۲]. پودر آلومینیم به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و متالورژیکی که متأثر از روش تولید نیز می‌باشد برای انواع کاربردها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و به طور گسترده در سوخت هواپیماها، تشخیص اثر انگشت، بتن هوادهی شده‌ی سبک، ماده‌ی افزودنی به رنگ خودرو و مواد منفجره استفاده می‌شود [۱۳].

1. E.J.Hall
2. Sherafat

* نویسنده مسئول:
دکتر مازیار آزادبه

نشانی: تبریز، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، گروه مهندسی مواد.
تلفن: ۰۲۰۴۱۴۵۰۲ (۴۱) ۹۸-

پست الکترونیکی: narminmalekpoor@yahoo.com

در اسید نیتریک رقیق (HNO_3) و ۴- نهایتاً شستشو با آب داغ. سپس ذرات آلومینیم تمیزکاری شده، در خشک‌کن با درجه حرارت 100°C خشک شده و در دسیکاتور نگهداری شدند [۲۱]. چپس‌های خشک شده با ابعاد کوچک‌تر از ۱۰ میلی‌متر، به دستگاه آسیای سیاره‌ای با فرکانس ۲۲/۸ بر ثانیه و سرعت ۲۵۰ دور در دقیقه تغذیه شدند. بعد از هر ساعت کاری، ۱۵ دقیقه زمان استراحت در نظر گرفته شد. آسیاکاری بدون عامل کنترل کننده فرآیند (PCA) و هم‌چنین در حضور آن انجام گرفت. در غیاب PCA، نسبت وزن گلوله به پودر^۵ برابر ۱۰، در تمام زمان‌های آسیاکاری، در نظر گرفته شد.

در حالت دوم، برای بررسی تأثیر PCA به‌منظور جلوگیری از چسبیدن پودر به گلوله‌ها، دیواره کاپ و به یکدیگر، اسید استئاریک^۶ [$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$] با درصد‌های وزنی مختلف (۰/۱، ۰/۲ و ۲ درصد وزنی) برای دو مدت زمان ۲۰ و ۳۰ ساعت استفاده شد. هم‌چنین برای ایجاد شرایط یکسان و قابل مقایسه با عملیات قبلی آسیاکاری پارامترهای دیگر نظیر جنس گلوله‌ها، اندازه و تعداد آن‌ها مطابق فرآیند قبلی انتخاب شد. پارامترهای هر دو حالت از عملیات آسیاکاری با جزئیات در جدول ۱ برای مقایسه آورده شده است.

جدول ۱. پارامترهای عملیات آسیاکاری

زمان (ساعت)	درصد وزنی اسید استئاریک (%wt)	نسبت وزن گلوله به پودر (BPR)
۸	-	۱۰
۱۶	-	۱۰
۲۰	۰/۱	۱۰
۲۰	۰/۲	۱۰
۲۰	۲	۱۰
۲۴	-	۱۰
۳۰	۰/۱	۱۰
۳۰	۰/۲	۱۰
۳۲	-	۱۰
۴۸	-	۱۰

لازم به ذکر است که در طی عملیات آسیاکاری، برای جلوگیری از آلودگی اتمسفری پودر از گاز آرگون با خلوص بالا و گلوله‌های فولاد زنگ‌نزن با سه اندازه مختلف ۲۰، ۱۲ و ۱۰ میلی‌متری به ترتیب به تعداد ۶، ۵ و ۴ استفاده شدند. توزیع اندازه چپس‌های ریز کوچک‌تر از ۱۰ میلی‌متر با استفاده از نرم افزار ImageJ با محدوده اندازه‌گیری ۵/۰ تا ۸/۰ میلی‌متر تعیین شد.

4. Process Control Agent

5. Ball to powder ratio

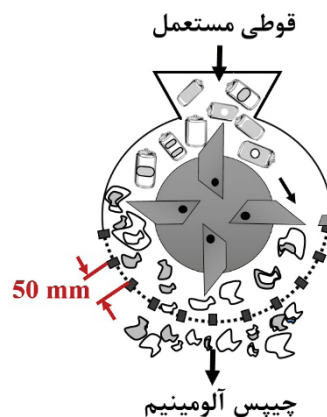
6. Stearic acid

تراشکاری راه، پس از آسیاکاری چکشی به ذرات کوچک‌تر از ۵۰ میلی‌متر تبدیل آن نمودند [۱۵].

قوطی‌های مستعمل نوشیدنی یکی دیگر از منابع رو به رشد ضایعات آلومینیمی است و بررسی روش‌های مؤثر برای بازیافت آن‌ها موضوع بسیار مهمی در این ارتباط است. بازیافت این منبع با روش‌های متداول منجر به صرف انرژی بالاتر و بهره‌وری کمتر می‌شود [۱۶-۱۸]. در حالی که روش پیشنهادی در این تحقیق که، قوطی‌های مستعمل آلومینیمی نوشیدنی را با بازیافت حالت جامد به پودر آلومینیم تبدیل می‌کند، از بهره‌وری و بازده بالاتری برخوردار بوده و از طرفی محصولی با ارزش افزوده قابل ملاحظه‌ای تولید می‌شود.

۲. مواد و روش تحقیق

مواد اولیه‌ی این تحقیق که قوطی‌های آلومینیم مستعمل نوشیدنی سری ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ می‌باشند، در آسیای چکشی صنعتی چهار پره (شکل ۱) با الکتروموتور به توان ۲۵ اسب بخار در دو مرحله با توری دارای سوراخ‌هایی به ترتیب به‌اندازه ۵۰ و ۱۰ میلی‌متر آسیاکاری می‌شوند. در این تحقیق، تکه‌های آلومینیمی کوچک‌تر از ۱۰ میلی‌متری، چپس ریز نامیده می‌شوند [۱۹].



شکل ۱. طرحواره آسیای چکشی برای خردایش مواد اولیه.

در مرحله‌ی بعدی، رنگ‌زدایی با استفاده از روش حرارتی و با دستگاه درام ایدکس^۳ به قطر تقریبی منطقه مرکزی در حدود ۶۰ سانتی‌متر و سرعت ۲۵ دور در دقیقه در دمای ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲۰ ثانیه تحت اتمسفر هوای معمولی انجام شد [۲۰]. برای حذف اکسیدها و چربی‌های سطحی احتمالی بر روی چپس‌های ریز آلومینیمی، طبق روش ذکر شده در مرجع [۲۱] تمیزکاری شیمیایی به‌صورت زیر انجام گرفت: ۱- غوطه‌وری در حمام رقیق هیدروکسید سدیم (NaOH) 65°C ؛ ۲- شستشو با آب داغ؛ ۳- غوطه‌وری

3. IDEX furnace

ایکس می‌توان اندازه کریستالیت پودر آسیا شده را به دست آورد. رابطه ویلیامسون-هال به فرم زیر می‌باشد [۲۳]:

$$\beta \cos \theta = \frac{0.9\lambda}{d} + 2A\varepsilon \cdot \sin \theta$$

که در این رابطه λ طول موج اشعه ایکس (معمولاً لامپ مسی است که در این لامپ برابر $1/540.56$ آنگستروم می‌باشد)، d اندازه کریستالیت، A ثابت (معمولاً برابر ۱ می‌باشد)، β پهناي پیک در نیمه ارتفاع آن (برحسب رادیان) و θ زاویه‌ی براگ می‌باشد. با توجه به نوع معادله ویلیامسون-هال می‌توان فهمید که اگر داده‌های $\beta \cos \theta$ برحسب $\sin \theta$ برای چند پیک پراش اشعه ایکس رسم شود، بر روی یک خط راست قرار می‌گیرند که عرض از مبدأ آن خط، اندازه کریستالیت‌ها را گزارش می‌دهد. لازم به ذکر است که برای کاهش درصد خطا در اندازه‌گیری پهناي پیک‌ها، رسم نمودار و برازش منحنی، از نرم‌افزار σ plot استفاده شده است [۲۳].

۳. نتایج و بحث

مطالعه مواد مصرفی (چیپس ریز ۱۰ میلی متری)

شکل ۲ (الف) مورفولوژی و توزیع اندازه ذرات چیپس‌های ریز با ابعاد کوچک‌تر از ۱۰ میلی متری و شکل ۲ (ب) نمودار توزیع اندازه چیپس‌های ریز را با استفاده از نرم افزار ImageJ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ذرات آلومینیمی دارای اشکال نامنظم بوده و نمودار توزیع اندازه‌ی آن‌ها از نوع مدل دوکوهانه با دو پیک در مقادیر ۴ و ۵ میلی متر می‌باشد. از آنجائی که مقادیر و مورفولوژی فازهای بین فلزی نقش اساسی در تغییر مکانیزم شکست ذرات (در واقع عمل خردایش) ایفا می‌کند به مطالعه تصویر SEM و آنالیز نقطه‌ای EDS چیپس‌های ریز کوچک‌تر از ۱۰ میلی متری قبل از شستشوی شیمیایی (اکسید و روغن‌زدایی) پرداخته شد. همان‌طوری که در تصویر شکل ۳ مشهود است، فاز ثانویه با ترکیب $Al_6(Mn,Fe)$ با مورفولوژی چند وجهی، که اغلب برابر ۳ میکرون می‌باشد، در این چیپس‌ها پراکنده شده‌اند که باعث تسریع عمل خردایش از محل قرارگیری می‌شوند [۲۴]. علاوه براین، از تصاویر SEM برای بررسی اثر محلول‌های شیمیایی حین تمیزکاری استفاده شد. میکروگراف SEM از چیپس‌های آلومینیمی قبل و بعد از تمیز کردن در حمام NaOH و HNO_3 در شکل ۴ نشان داده شده است.

این تصاویر به‌وضوح نشان می‌دهد که با قرار گرفتن آن‌ها در سود و اسید نیتریک، سطح با حفره‌هایی با چگالی کم پوشیده شده است و دیگر اثری از فازهای بین فلزی موجود در مواد اولیه (قوطی و چیپس) پیدا نیست که نشان‌دهنده‌ی پیوند ضعیف این فازها با زمینه می‌باشد. به عبارت دیگر

توزیع اندازه ذرات پودر آلومینیمی حاصل از آسیاکاری، مطابق استاندارد آمریکایی آزمون غربال سری (ASTM E11) با استفاده از الک ۶ با شماره مش‌های ۵۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۷۰، ۲۰۰، ۲۳۰، ۲۷۰، ۳۲۵ و ۴۰۰ تعیین گردید. با استفاده از نتایج حاصله نمودار فراوانی و نمودار فراوانی تجمعی برای بررسی دقیق‌تر رسم شد.

مورفولوژی سطحی و آنالیز چیپس‌های با ابعاد کوچک‌تر از ۱۰ میلی متر، قبل و بعد از عملیات شستشوی شیمیایی و سنباده‌زنی و هم چنین مورفولوژی، توزیع اندازه ذرات و سطح مقطع پودرهای آلومینیم توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Cam Scan MV2300 مجهز به طیف‌سنج EDS مورد مطالعه قرار گرفت.

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری کمی عناصر شیمیایی و بررسی تأثیر شستشوی شیمیایی بر روی مواد اولیه (چیپس ریز) و بررسی تأثیر افزودن PCA بر روی محصول فرآیند آسیاکاری (پودر)، روش طیف‌سنجی جذب اتمی^۷ با دستگاه مدل Varian 240 AA مورد استفاده قرار گرفت.

برای متالوگرافی سطح مقطع چیپس‌ها و پودرهای حاصل از فرآیند آسیاکاری، پس از مانع سرد ذرات و سنباده زنی مطابق مرجع [۲۲] از دو روش شیمیایی و الکتروشیمیایی برای پولیش و اچ نمونه‌ها استفاده شد. در نوع اول، آماده‌سازی چیپس‌ها و یا پودرها پس از پولیش معمولی با استفاده از محلول کلر^۸ حاوی ۱۹۰ میلی لیتر آب مقطر، ۳ میلی لیتر اسید هیدروکلریک (HCl)، ۵ میلی لیتر اسید نیتریک (HNO_3)، ۲ میلی لیتر اسید هیدروفلوئوریک (HF) اچ شیمیایی شد. در نوع دوم، الکتروپولیش با ۸۰۰ میلی لیتر اتانول، ۱۴۰ میلی لیتر آب مقطر، ۶۰ میلی لیتر $HClO_4$ (۶۰٪) با ولتاژ سلول ۳۰-۸۰ ولت و زمان ۱۵-۶۰ ثانیه و الکترواچ با ۴-۵ میلی لیتر HBF_4 و ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر (معرف بارکر^۹) در ۲۰ ولت به مدت ۴۰-۸۰ ثانیه انجام شد [۲۲]. جهت بررسی ریزساختار سطح مقطع از میکروسکوپ نوری Olympus مدل PMG3 استفاده شد. از آنجایی که آشکارشدن مرز دانه در آلیاژهای آلومینیمی مشکل‌ساز می‌باشد، برای ظاهر ساختن ساختار دانه نور پولاریزه انتخاب شد.

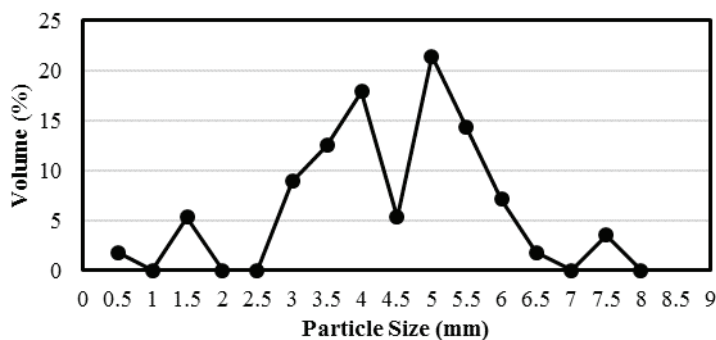
برای تعیین فازهای تشکیل دهنده چیپس‌های ریز آلومینیمی و پودر حاصل از آسیاکاری آن‌ها، پراش اشعه ایکس ((BRUKER-binary V3 (RAW)) با استفاده از تابش Cuka (با طول موج $1/540.56$ آنگستروم، ۴۰ کیلوولت و ۴۰ میلی آمپر)، سرعت اسکن ۴ درجه بر دقیقه، در محدوده زاویه $2\theta=120-20$ مورد استفاده قرار گرفت. هم‌چنین تأثیر مدت زمان آسیاکاری بر شدت و پهناي پیک‌ها بررسی شد. با استفاده از رابطه ویلیامسون-هال^{۱۰} و الگوی پراش پرتوی

7. Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

8. Keller's reagent

9. Barker's reagent

10. Williamson-Hall

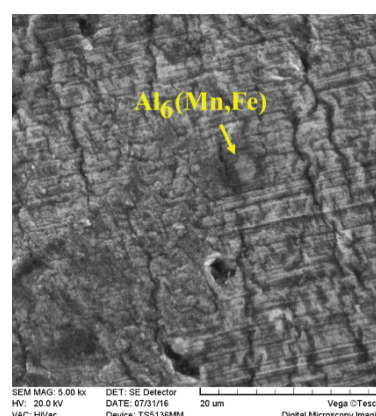
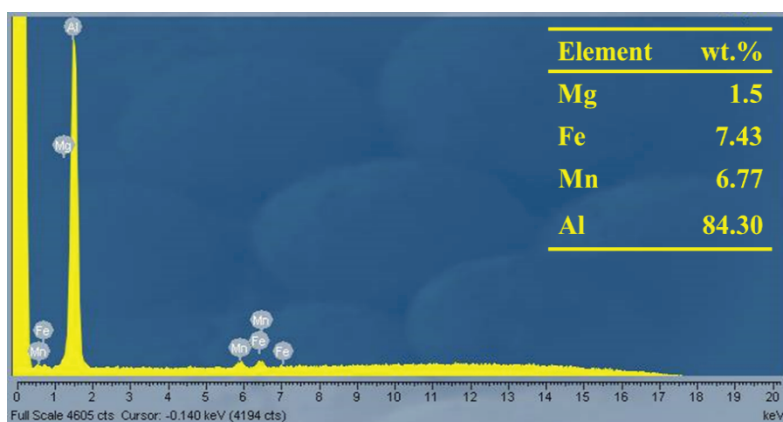


(ب)

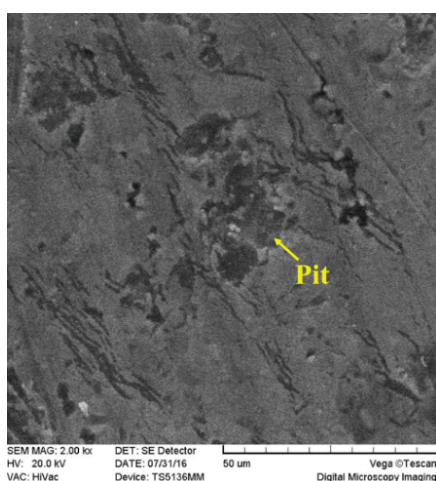


(الف)

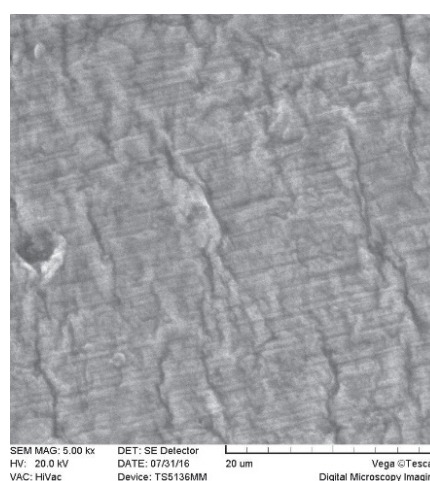
شکل ۲. آنالیز چپس‌های ریز با استفاده از نرم افزار ImageJ (الف: تصویر چپس‌های ریز و (ب) منحنی توزیع اندازه دانه.



شکل ۳. تصویر SEM و آنالیز نقطه‌ای EDS چپس رنگ زدایی شده (اندازه کوچک‌تر از ۱۰ میلی‌متر) بدون هیچ‌گونه عملیات تمیزکاری شیمیایی و سنباده‌زنی.



(ب)

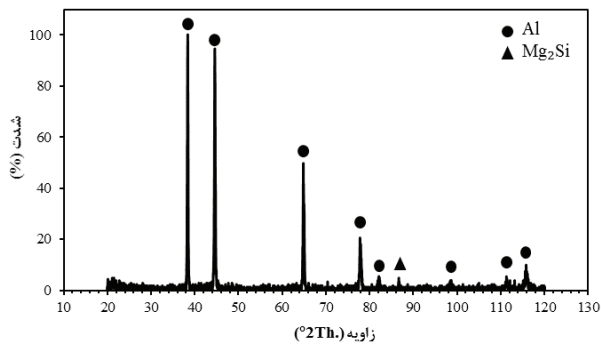


(الف)

شکل ۴. میکروگراف SEM چپس آلومینیمی با اندازه کوچک‌تر از ۱۰ میلی‌متر و بدون هیچ‌گونه عملیات آماده‌سازی و سنباده‌زنی: (الف) قبل و (ب) بعد، از عملیات تمیزکاری شیمیایی در حمام سود و اسید نیتریک.

آنالیز جذب اتمی برای تعیین دقیق عناصر قبل و بعد از تمیزکاری چپس‌های ریز با ابعاد کوچک‌تر از ۱۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده

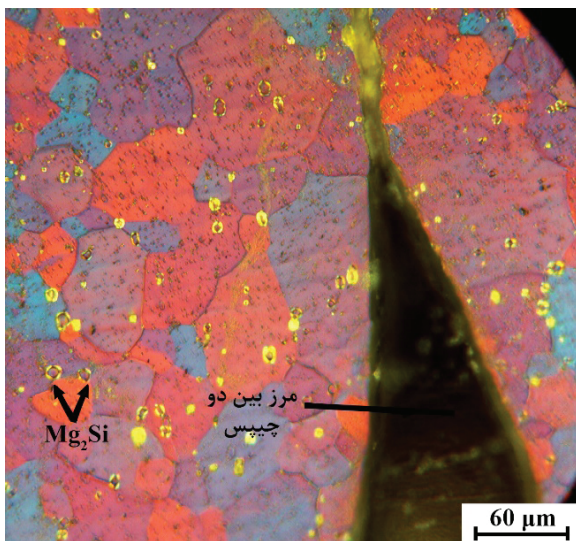
می‌توان بیان کرد که محلول‌های بکار گرفته شده، علاوه بر حذف آلودگی‌های موجود، باعث خورده شدن زمینه فلزی چپس‌ها شده است.



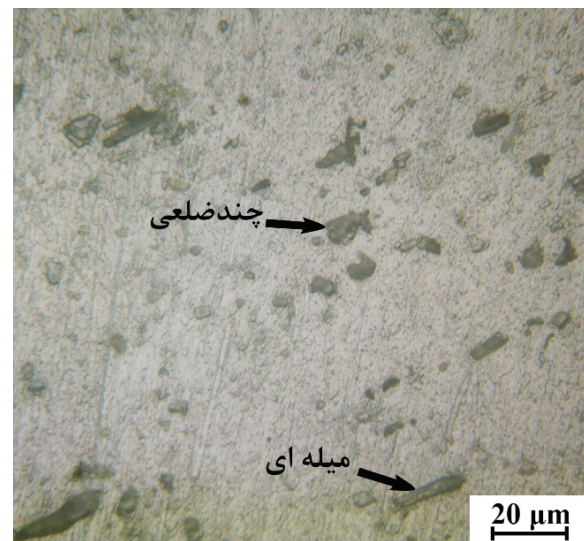
شکل ۵. الگوی پراش اشعه ایکس چپس قبل از آسیاکاری با اندازه کوچکتر از ۱۰ میلی‌متر.

جدول ۲. آنالیز شیمیایی چپس ریز.

عنصر	قبل شستشوی شیمیایی (درصد وزنی).	بعد شستشوی شیمیایی (درصد وزنی).
Mg	۰/۱۵۴	۰/۱۷۷۵
Mn	۰/۶۶۵۴	۰/۶۶۰۸
Fe	۰/۳۶۴۸	۰/۳۳۱۷
Pb	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۸۸
Cu	۰/۱۶۴۵	۰/۱۵۹۷



(ب)



(الف)

شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی نوری چپس‌های فشرده با ابعاد کوچکتر از ۱۰ میلی‌متر: (الف) نور معمولی؛ نمونه پولیش و اچ شیمیایی شده و (ب) نور پلاریزه؛ نمونه الکتروپولیش و الکترواچ شده.

متالورژی هم قابل درک است، به این صورت که دانه‌ها با توجه به جهت‌های مختلف کریستالوگرافی در زیر نور پلاریزه با رنگ‌های مختلفی ظاهر می‌شوند و تشخیص اندازه دانه‌ها به سهولت نمایان می‌شود. با تصاویر میکروسکوپی نوری اجازه‌ی شناسایی فاز بین فلزی Mg_2Si (تعیین شده از شکل ۵) و $Al_6(Fe, Mn)$ (تعیین شده از شکل ۳) به صورت ذرات سیاه و زردرنگ به ترتیب به وسیله‌ی نور معمولی و نور پلاریزه داده می‌شود. این ذرات بین فلزی با مورفولوژی‌هایی مختلف، اسکریپت مانند^{۱۱}، چندضلعی و ذرات کوچک کروی (شکل ۶ الف) و (ب)) پراکنده شدند.

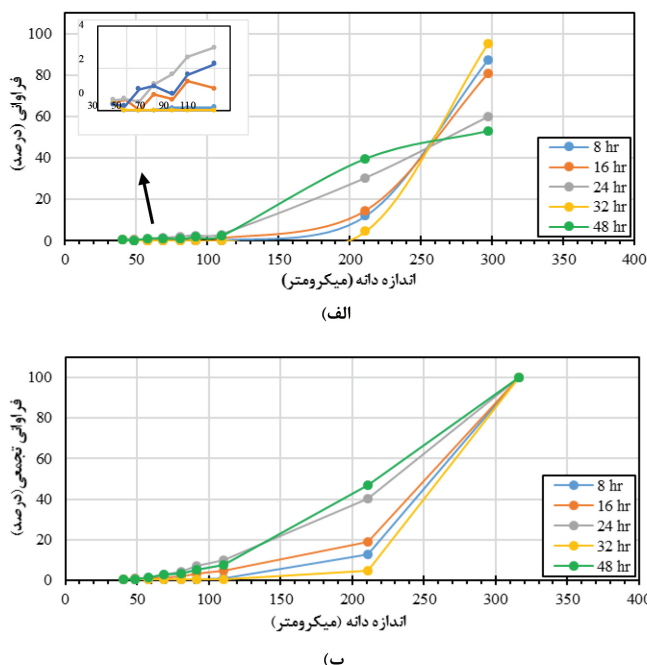
بنابراین، با نتایج به دست آمده از مطالعه مواد اولیه آسیاکاری (یعنی چپس‌های آلومینیمی)، دلیل اینکه چرا مواد نرمی مثل آلومینیم قابلیت تولید پودر به روش آسیاکاری و خردایش دارد قابل تشخیص می‌باشد.

است. با مقایسه نتایج شکل ۴ و جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که محلول‌های تمیزکاری شیمیایی گزینه مناسب برای این مرحله به شمار می‌رود ولی با این حال برای جلوگیری از اتلاف ماده، بایستی حالت رقیقی از آن‌ها را برای تمیزکاری شیمیایی تهیه و استفاده کرد.

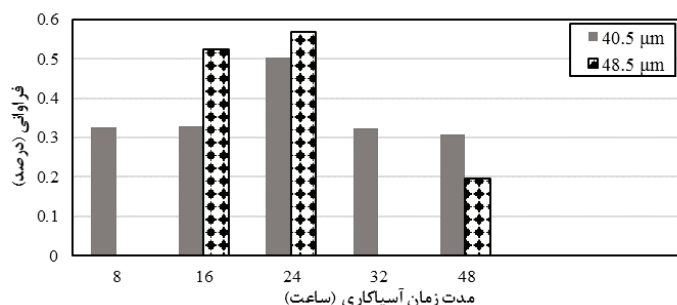
شکل ۵، الگوی پراش اشعه ایکس چپس‌های ریز با ابعاد کوچکتر از ۱۰ میلی‌متر را که در این پژوهش، به‌عنوان خوراک دستگاه آسیای سیاره‌ای مورد استفاده قرار گرفته، نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که پیک ۲θ برابر ۸۶/۶۰۹۰ مربوط به ترکیب بین فلزی منیزیم-سیلیسیم، به‌طور خاص Mg_2Si ، می‌باشد.

شکل ۶ عکس‌های متالوگرافی چپس‌های فشرده شده (با اندازه کوچکتر از ۱۰ میلی‌متر) در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال در زیر نور معمولی و نور پلاریزه برای تعیین اندازه دانه این آلیاژ آلومینیم را نشان می‌دهد. این نکته با توجه به مفاهیم

11. Script like



شکل ۷. منحنی‌های توزیع اندازه پودر آلومینیم آسیاکاری شده تحت شرایط زیر: گلوله‌هایی با اندازه ۱۰، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر، سرعت چرخش ۲۵۰ دور بر دقیقه، نسبت وزن گلوله به پودر ۱:۱۰ و بدون هیچ افزودنی برای کنترل فرآیند: الف) منحنی توزیع اندازه و ب) منحنی توزیع فراوانی تجمعی.



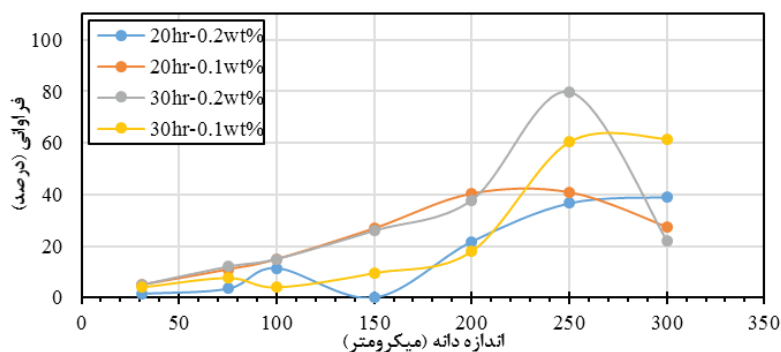
شکل ۸. منحنی درصد فراوانی ریزترین پودرها نسبت به زمان آسیاکاری برای نسبت وزن گلوله به پودر ۱:۱۰.

توسط دستگاه آسیاکاری می‌باشد. از طرف دیگر با افزایش زمان آسیاکاری از ۲۴ به ۳۲ ساعت، شیفت شدیدی به سمت راست در نمودار توزیع اندازه و در نتیجه پدیده آگلومراسیون رخ داده است که بیانگر افزایش چشمگیر اندازه ذرات می‌باشد. با افزایش دوباره زمان آسیاکاری تا ۴۸ ساعت و بیشتر شدن انرژی ضربه در طی این مدت زمان طولانی از آسیاکاری، منجر به خردایش مجدد ذرات آگلومره و کاهش چشمگیری در اندازه ذرات شده است. بنابراین، بیشترین پودر تولیدی و شرایط بهینه برای این تحقیق، با نسبت BPR برابر ۱۰ در مدت زمان آسیاکاری ۲۴ ساعت حاصل شده است.

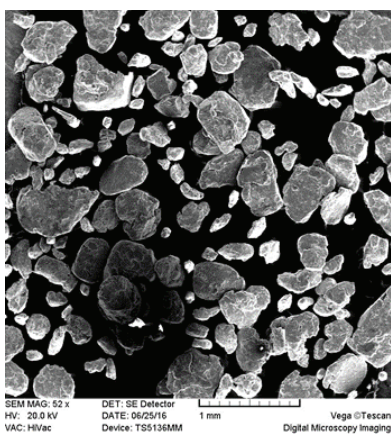
علاوه بر پرداختن به اندازه متوسط پودر، در بحث حجم پودر تولیدی می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر پودر ریز قابل اندازه‌گیری (۴۱ میکرون) با نسبت BPR برابر ۱۰ در مدت

مطالعه پودرهای آلومینیم به دست آمده

خصوصیات پودرهای حاصل از آسیاکاری که شامل اندازه، توزیع ذرات، مورفولوژی، اندازه کریستالی و تعیین فاز می‌باشد، توسط SEM و XRD مشخص شدند. شکل ۷ (الف) و ۷ (ب) به ترتیب درصد فراوانی و فراوانی تجمعی اندازه ذرات پودرهای تولید شده با زمان آسیاکاری ۸ تا ۴۸ ساعت و نسبت وزن گلوله به پودر ۱:۱۰ را نشان می‌دهد که شکل توزیع اندازه ذرات آن‌ها با داشتن یک پیک عمده در ۳۱۶ میکرون از نوع مدل تک کوهانه بوده و علی‌رغم افزایش زمان آسیاکاری، منحنی توزیع اندازه ذرات شکل یک کوهانه‌ی خود را حفظ کردند. نکته قابل توجه دیگر این می‌باشد که با افزایش مدت زمان آسیاکاری از ۸ تا ۲۴ ساعت، نمودارهای توزیع اندازه ذره به سمت چپ شیفت پیدا کرده‌اند که نشان از اتفاق افتادن عمل خردایش



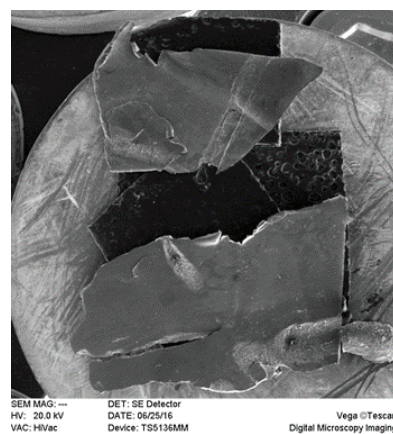
شکل ۹. منحنی‌های توزیع اندازه پودر آلومینیم حاصل از آسیابکاری با دو درصد وزنی ۰/۱ و ۰/۲ اسید استتاریک برای دو مدت مختلف.



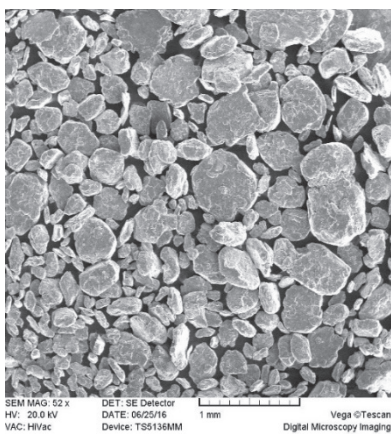
(ج)



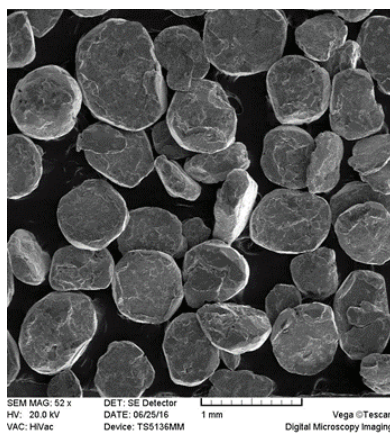
(ب)



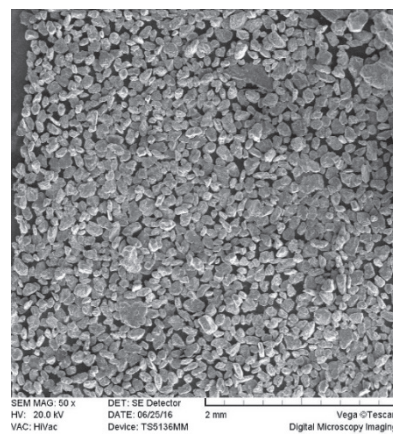
(الف)



(ی)



(ه)



(د)

شکل ۱۰. تصاویر SEM چپس‌های اولیه ۱۰ میلی‌متری و پودرهای حاصل از آسیابکاری مکانیکی به مدت زمان‌های مختلف تحت شرایط یکسان: ۱۵ گلوله (۱۰)، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر، سرعت چرخش ۲۵۰ دور در دقیقه، نسبت وزن گلوله به پودر ۱:۱۰ و بدون هرگونه عامل کنترل‌کننده فرآیند (PCA): (الف) بدون آسیابکاری، (ب) ۸ ساعت، (ج) ۱۶ ساعت، (د) ۲۴ ساعت، (ه) ۳۲ ساعت و (ی) ۴۸ ساعت.

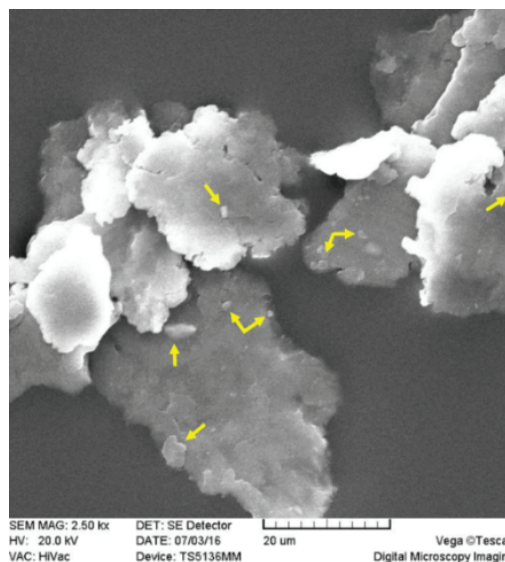
ذوب پایین آلومینیم باشد، چراکه وقتی زمان آسیابکاری تا ۳۲ ساعت افزایش یافته، دمای کاپ‌های آسیابکاری بیشتر و در نتیجه آگلومراسیون رخ می‌دهد که افزایش در اندازه ذرات از نتایج آن خواهد بود. با افزایش زمان آسیابکاری به ۴۸

زمان آسیابکاری ۲۴ ساعت تولید شد (شکل ۸ (الف)) و ذرات پودر آلومینیم در مدت زمان ۳۲ ساعت شروع به آگلومراسیون کرده و شکل ذرات از حالت ورقه‌ای به شکل کروی تغییر کرده است (شکل ۱۰ (ه)). این اتفاق می‌تواند به دلیل دمای

آلی با نقطه ذوب و جوش پایین هستند، به سبب گرمای ایجاد شده حین آسیابکاری تجزیه می‌شوند. محصولات ناشی از تجزیه شامل کربن، اکسیژن و هیدروژن بوده که با اتم‌های فلزی تشکیل کاربیدها، اکسیدها، هیدریدها و سایر ترکیبات را می‌دهند [۲۵]. بنابراین، یکی از روش‌های کاهش آلودگی، اجتناب از استفاده PCAها می‌باشد؛ هرچند که ممکن است پدیده جوش سرد پودرها افزایش یابد [۲۶].

شکل ۱۰ تصاویر SEM پودرهای آلومینیمی که تحت شرایط بهینه‌ی مدت زمان ۴۸-۸ ساعت با ۱۵ گلوله (۱۰، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر) در سرعت چرخش ۲۵۰ دور در دقیقه و با نسبت وزن گلوله به پودر ۱:۱۰، بدون PCA آسیابکاری شدند، نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، یکنواخت‌ترین و کوچک‌ترین توزیع اندازه ذره در ۲۴ ساعت (شکل ۱۰ ب)) تولید شد و در ۳۲ ساعت از زمان آسیابکاری، نرخ آگلومراسیون پودرها بالاتر از تکه‌تکه شدن آن‌ها بوده که منجر به افزایش اندازه ذرات پودر و تغییر مورفولوژی آن‌ها از چند ضلعی به کروی درشت (شکل ۱۰ ه)) شد [۲۶]. هم‌چنین در شکل ۱۰ ی)) مکانیزم خردایش مجدد ذرات آگلومره به‌وضوح قابل مشاهده است که باعث کاهش اندازه پودرهای آلومینیومی در طولانی مدت شده است. این روش (بازیافت حالت جامد) موفق به تولید ذرات پودر آلومینیم با اندازه تقریبی ۲ میکرون نیز شده است، که ساختار این ذرات پودر با شکل پوسته‌پوسته در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. قابل توجه است که این ذرات پودری خیلی ریز، را نمی‌توان در روش الک اندازه‌گیری کرد و در نمودارهای توزیع ذرات لحاظ نشده‌اند.

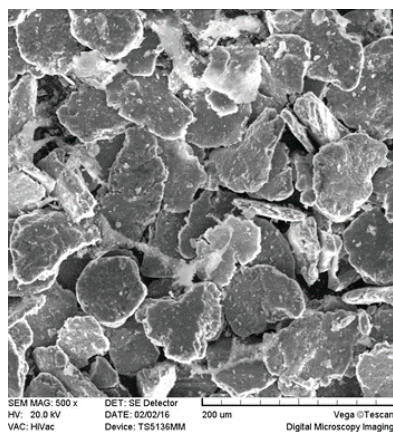
شکل ۱۲ تصاویر پودرهای حاصل از آسیابکاری به مدت ۲۰ ساعت و تحت درصدهای مختلف وزنی اسید استتاریک (۰/۱، ۰/۲ و ۲ درصد وزنی) را برای بررسی تأثیر مقدار عامل کنترل کننده فرآیند آسیابکاری بر روی اندازه، مورفولوژی و آلودگی ظاهری پودر حاصل نشان می‌دهد. لذا با توجه به



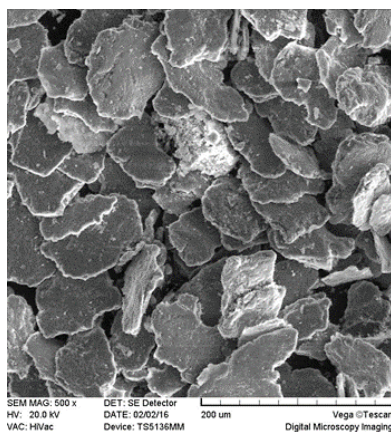
شکل ۱۱. تصویر SEM پودر آلومینیم با متوسط اندازه ۲۰ میکرومتر آسیاب شده در شرایط: مدت زمان ۲۰ ساعت، سرعت چرخش ۲۵۰ دور در دقیقه، نسبت وزن گلوله به پودر ۱:۱۰، و بدون هیچ‌گونه عامل کنترل فرآیند.

ساعت، افزایش انرژی و ضربات وارده به مواد داخل کاپ‌ها، مکانیزم خردایش به آگلومراسیون غلبه کرده و خردایش مجدد ذرات کروی آگلومره را منجر می‌شوند.

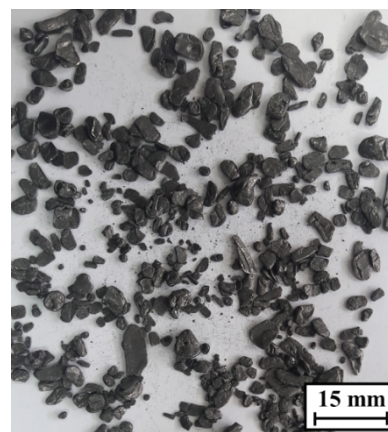
برای مطالعه بیشتر پارامترهای آسیابکاری مکانیکی، زمان آسیابکاری ۲۰ و ۳۰ ساعت برای نشان دادن اثر اسید استتاریک در منحنی توزیع اندازه دانه انتخاب شدند. با نگاه به شکل ۹ می‌توان دریافت که با افزودن اسید استتاریک با درصدهای کمتر از ۲ می‌توان به اندازه پودر کمتر از ۳۰ میکرون هم دست یافت ولی علاوه بر پارامتر اندازه دانه، نکته‌ی که باید مورد توجه قرار گیرد، آلودگی و قابلیت کاربرد آزمایشگاهی و صنعتی پودرها می‌باشد. ممکن است آلودگی ناشی از PCA شایع‌ترین آن‌ها باشد. از آنجاکه اغلب این عوامل ترکیبات



(ج)

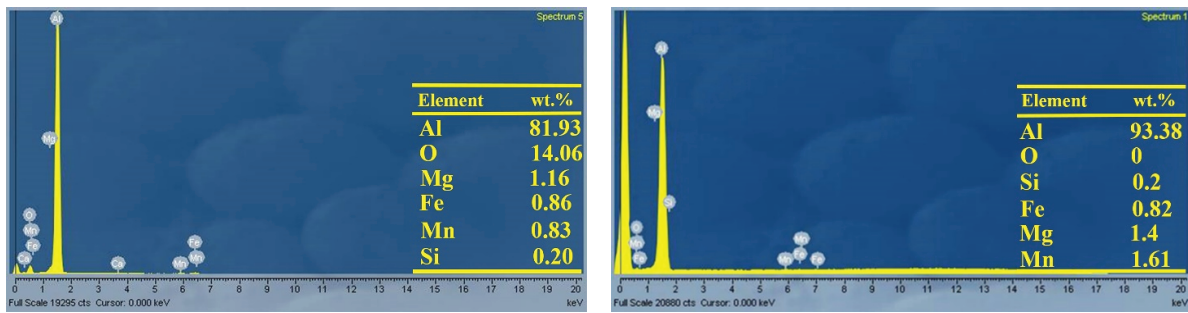


(ب)



(الف)

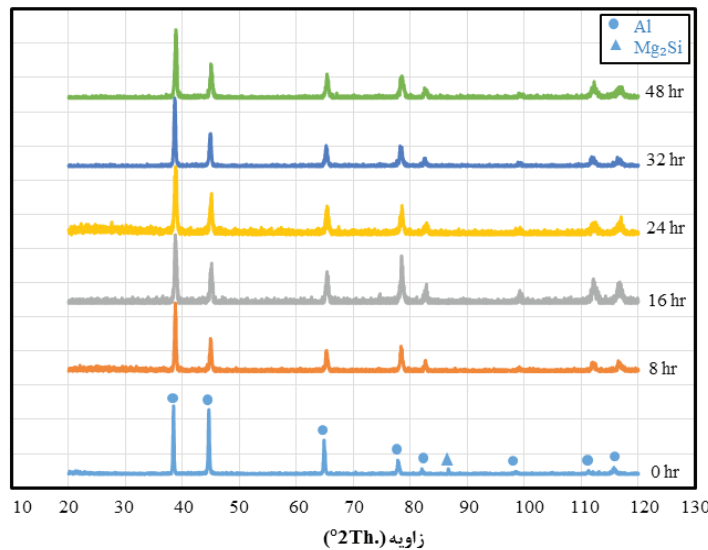
شکل ۱۲. تصاویر پودرهای حاصل از آسیابکاری به مدت ۲۰ ساعت و تحت درصدهای مختلف اسید استتاریک به‌عنوان PCA: (الف) ۲، (ب) ۰/۲ و (ج) ۰/۱ درصد وزنی.



(ب)

(الف)

شکل ۱۳. طیف EDS پودر آلومینیم آسیاشده تحت شرایط یکسان: گلوله‌هایی با اندازه ۱۰، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر، سرعت چرخش ۲۵۰ دوربر دقیقه، نسبت وزن گلوله به پودر ۱:۱۰ در حضور و بدون اسید استتاریک: (الف) ۴۸ ساعت و بدون اسید استتاریک و (ب) ۲۰ ساعت و ۰/۲ درصد اسید استتاریک



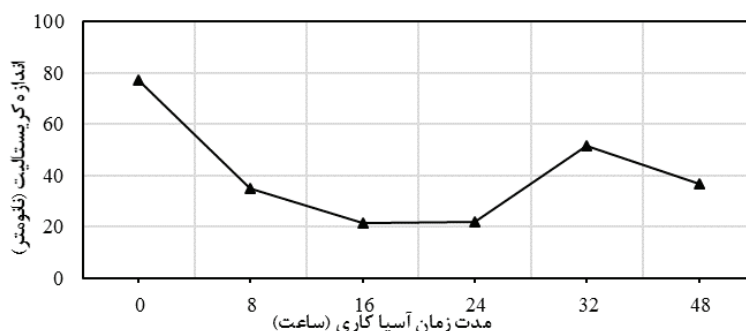
شکل ۱۴. الگوی پراش XRD چپس ریز و پودرهای آسیا شده در زمان‌های مختلف.

مورفولوژی ورقه‌ای و دوبعدی می‌باشند. علت تشکیل ساختار سه بعدی ذرات را می‌توان در ماهیت بازدارنده‌ی PCA از مکانیزم جوش سرد جستجو کرد.

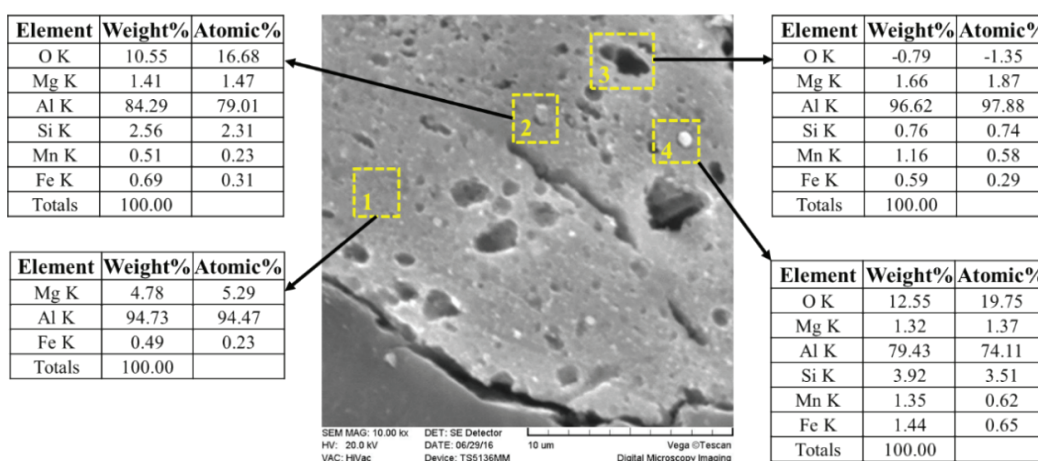
به‌منظور بررسی تأثیر افزودن اسید استتاریک، آنالیز EDS برای پودر تولید شده در شکل ۱۳ انجام شده است. آنالیز EDS در شکل ۱۳ (الف) و (ب) نشان می‌دهد که درصد اتمی اکسیژن برای دو نوع پودر تولیدی با آسیاکاری به مدت ۴۸ ساعت و بدون هیچ‌گونه عامل کنترل‌کننده فرآیند و آسیاکاری به مدت ۲۰ ساعت و ۰/۲ درصد وزنی اسید استتاریک، به ترتیب صفر و ۱۴ بوده است. درصد زیاد اکسیژن در شکل ۱۳ (ب) به دلیل ماهیت PCA به‌عنوان ترکیبات آلی می‌باشد. از آنجاکه اغلب این ترکیبات با نقطه ذوب و جوش پایین هستند، به سبب گرمای ایجاد شده حین آسیاکاری تجزیه می‌شوند. اکسیژن هم جزو محصولات ناشی از تجزیه بوده که با اتم‌های فلزی تشکیل اکسیدها را می‌دهند. الگوی XRD چپس ریز و پودرهای آلومینیمی حاصل در

اهمیت مقدار بحرانی عوامل کنترل‌کننده اعم از استتاریک اسید، از تصویر ۱۲ (الف) می‌توان دریافت که چپس‌های آلومینیم با اندازه‌ی کوچک‌تر از ۱۰ میلی‌متر بعد از ۲۰ ساعت آسیاکاری، به همان ابعاد باقی‌مانده‌اند و با کاهش مقدار PCA به مقادیر ۰/۲ و ۰/۱ درصد وزنی، حداقل اندازه ذرات کوچک‌تر از ۳۱ میکرومتر به دست آمد (به‌ترتیب اشکال ۱۲ (ب) و (ج))؛ اما باید به این نکته توجه کرد که آلودگی و اکسید پودرهایی با اسید استتاریک ۲ درصد وزنی از لحاظ ظاهری به‌شدت آلوده شدند و وقتی آسیاکاری تحت ۲/۰ و ۱/۰ درصد وزنی اسید استتاریک انجام شد، آلودگی ظاهری آن‌ها به ترتیب کاهش پیدا کرده است که به‌منظور بررسی جزئی‌تر این آلودگی‌ها آنالیز عنصری EDS انجام شده است.

نکته مهم دیگری که از مقایسه شکل ۱۰ و ۱۲ می‌توان دریافت این است که پودرهای حاصل از آسیاکاری بدون افزودن PCA دارای مورفولوژی چندضلعی سه بعدی می‌باشد ولی پودرهای آسیاکاری شده در حضور اسید استتاریک دارای



شکل ۱۵. تغییرات اندازه کریستالیت در زمان‌های مختلف آسیابکاری.



شکل ۱۶. تصاویر SEM و آنالیز EDS به دست آمده از سطح مقطع پودر آسیابکاری شده با اندازه ذرات کوچک‌تر از ۴۰ میکرومتر: (۱) زمینه، ۲ تا ۴) فازهای ناپایدار اکسیدی ایجاد شده توسط تجزیه اسید استتاریک به عناصر اکسیژن، کربن و هیدروژن.

شده و پهنای آن‌ها بزرگ‌تر شده‌اند و این پدیده، حاکی از کاهش اندازه کریستالیت‌ها می‌باشد که با استفاده از معادله ویلیامسون-هال قابل اثبات است (شکل ۱۵). علت کاهش اندازه کریستالیت، احتمالاً تغییر شکل پلاستیک ذرات پودر حین آسیابکاری و افزایش در انرژی داخلی، نابجایی‌ها و سایر عیوب می‌باشد. علاوه بر این، کار سرد باعث ایجاد نقص در چیده شدن می‌شود.

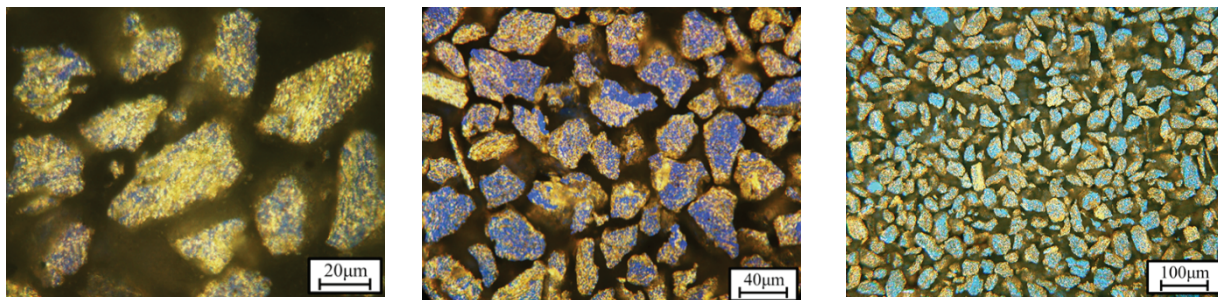
برای مطالعه سطح مقطع پودرهای حاصل از آسیابکاری با حضور عامل کنترل کننده و ریزساختار آن‌ها از میکروسکوپ نوری و الکترون روبشی استفاده شد.

شکل ۱۶، تصاویر SEM و آنالیز EDS از سطح مقطع پودر با اندازه‌ی ذره کوچک‌تر از ۴۰ میکرومتر پس از عملیات آماده‌سازی (سنباده‌زنی، پولیش معمولی و اچ با معرف کلر) به منظور بررسی ترکیبات ثانویه موجود، تهیه شدند.

همان‌طوری که دیده می‌شود، در سطح مقطع به دست آمده از پودر، حفره‌هایی متأثر از فرآیند آسیابکاری و هم‌چنین فازهای ناپایدار اکسیدی وجود دارند که به نظر می‌رسد اسید استتاریک اضافه شده به عنوان PCA باعث اکسیداسیون شدید شده است که این نظریه با نتایج شکل ۱۳ نیز همخوانی دارد.

شکل ۱۴ نشان داده شده است. با مقایسه پیک‌های ظاهر شده در پودرهای حاصل از آسیابکاری به مدت زمان‌های ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲ و ۴۸ ساعت ملاحظه می‌شود که زاویه 2θ ای برابر $24.90/6.86$ که مربوط به ترکیب بین فلزی Mg_2Si در چپس ریز بوده، با ادامه فرآیند آسیابکاری و در مدت زمان ۸ ساعت به بعد از نتایج XRD حذف می‌شوند. نتیجه حاضر این نظریه را مطرح می‌کند که رسوبات با آسیابکاری به جمع پودرهای ریز پیوسته و احتمال اینکه اشعه پرتو ایکس به یک پودر درشت تابش داشته، قوی می‌باشد. در نتیجه، پیک مربوط به رسوبات با آسیابکاری حذف می‌شود ولی این نشان از ناپدید شدن خود رسوبات نیست.

انجام کار سرد و تغییر شکل پلاستیکی بر روی فلزات، منجر به تغییر محسوس در پهنای خطوط پراش پرتو ایکس می‌شود. بخشی از تغییر شکل پیک مربوط به ریز شدن دانه‌ها و بخشی دیگر مربوط به افزایش کرنش شبکه می‌باشد. با بررسی‌های آماری انجام گرفته بر روی شدت و پهنای پیک‌ها و با صرف نظر از خطای دستگاه (ناشی از توزیع طول موج و خطای هندسی) می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش زمان آسیابکاری تا ۲۴ ساعت، از شدت پیک‌ها کاسته



الف) بزرگنمایی کم

ب) بزرگنمایی متوسط

ج) بزرگنمایی زیاد

شکل ۱۷. میکروگرافی از مورفولوژی پودرهای آلومینیم آسیاکاری شده (اندازه دانه کوچکتر از ۴۰ میکرومتر).

دور در دقیقه، ۱۵ دقیقه زمان توقف بعد از ۱ ساعت کاری، بدون هیچ گونه PCA، نسبت وزن گلوله به پودر (BPR) ۱۰ به ۱ و تحت گاز آرگون.

۲. ذرات در مرحله میانی آسیاکاری (۳۲ ساعت) تحت مکانیزم جوش سرد و آگلومراسیون قرار گرفته و پس از ۳۲ ساعت (۴۸ ساعت)، آگلومره‌های بزرگ متشکل از ذرات ریز، دوباره شکسته شدند.

۳. ترکیبات بین فلزی مشاهده شده در نتایج XRD چپس‌های ریز، با اعمال تغییر شکل پلاستیک به صورت گسترده تحت تأثیر قرار گرفته و با افزایش زمان آسیاکاری اندازه‌ی آن‌ها کاهش یافته و در نتیجه در آخرین الک (مربوط به ریزترین پودرها) جمع می‌شوند. احتمالاً در حین انجام XRD، اشعه X به پودر درشت برخورد کرده، پیک‌های مربوط به رسوبات حذف شده‌اند و این نمی‌تواند نشان از ناپدید شدن رسوبات با انجام آسیاکاری باشد.

۴. استفاده از PCA اندازه ذرات را کاهش داده ولی رنگ تیره پودر (با ۰/۱، ۲/۰ و ۲ درصد وزنی اسید استتاریک)، نشان دهنده‌ی اکسیداسیون و آلودگی حاصل می‌باشد و باعث می‌شود که آن‌ها غیرقابل استفاده شوند. درصد اکسیداسیون ذرات پودر در حضور PCA، ۱۴ برابر بیشتر از مقدار آن برای ذرات پودر بدون PCA، گزارش شده است.

فازهای رسوبی دیگر موجود در مواد اولیه (چپس‌های ریز کوچکتر از ۱۰ میلی‌متر) (شکل ۳، ۵ و ۶ را ببینید)، در اثر ضربات تکراری آسیاکاری از زمینه جدا و کوچکتر شده‌اند. در نتیجه در تصاویر SEM قابل مشاهده نیستند و علت ایجاد حفره‌ها در سطح ذرات پودری همین نکته می‌تواند باشد. شکل ۱۷ تصاویر متالوگرافی سطح مقطع پودر مورد نظر را نشان می‌دهد و به دلیل اینکه آشکارسازی مرز دانه در آلیاژهای آلومینیمی مشکل‌ساز می‌باشد، برای ظاهرسازی ساختار دانه از نور پولاریزه استفاده شده است که مورفولوژی چندضلعی پودرها در این تصاویر هم قابل اثبات است.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، بازیافت حالت جامد ضایعات آلومینیمی از جنس آلیاژهای ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ به روش آسیاکاری مکانیکی (چکشی و سیاره‌ای) قوطی‌های مستعمل نوشیدنی آلومینیمی موفقیت‌آمیز بود. در این راستا محصولات به دست آمده ارزیابی شد و مشخص شد که:

۱. با افزایش زمان آسیاکاری اندازه دانه‌ها ریز شده و پس از ۲۴ ساعت ریزترین و تمیزترین پودرها (حتی تا ۲ میکرومتر) با شرایط آسیاکاری زیر به دست آمد: ۳ نوع گلوله با شعاع‌های ۱۰، ۱۲، ۲۰ میلی‌متر، سرعت چرخش ۲۵۰

References

- [1] Ab Rahim SN, Lajis MA, Ariffin S. A review on recycling aluminum chips by hot extrusion process. *Procedia CIRP*. 2015 Jan; 26:761-6.
- [2] Duflou JR, Tekkaya AE, Haase M, Welo T, Vanmeensel K, Kellens K, Dewulf W, Paraskevas D. Environmental assessment of solid state recycling routes for aluminium alloys: can solid state processes significantly reduce the environmental impact of aluminium recycling?. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2015 Dec 31;64(1):37-40.
- [3] Shamsudin S, Lajis MA, Zhong ZW. Evolutionary in solid state recycling techniques of aluminium: a review. *Procedia CIRP*. 2016 Jan 1;40:256-61.
- [4] Chiba R, Yoshimura M. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf into c-channel by hot extrusion. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015 Jan 31;17:1-8.
- [5] Misiolek WZ, Haase M, Khalifa NB, Tekkaya AE, Kleiner M. High quality extrudates from aluminum chips by new billet compaction and deformation routes. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2012 Dec 31;61(1):239-42.
- [6] Khoei AR, Masters I, Gethin DT. Design optimisation of aluminium recycling processes using Taguchi technique. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002 Sep 20;127(1):96-106.
- [7] Tekkaya AE, Schikorra M, Becker D, Biermann D, Hammer N, Pantke K. Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips. *Journal of materials processing technology*. 2009 Apr 1;209(7):3343-50.
- [8] Haase M, Tekkaya AE. Recycling of aluminum chips by hot extrusion with subsequent cold extrusion. *Procedia Engineering*. 2014 Jan 1;81:652-7.
- [9] Chiba R, Nakamura T, Kuroda M. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf through cold profile extrusion and cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011 Nov 30;211(11):1878-87.
- [10] Le HR, Sutcliffe MP. Analysis of surface roughness of cold-rolled aluminium foil. *Wear*. 2000 Aug 20;244(1):71-8.
- [11] Khamis SS, Lajis MA, Albert RA. A sustainable direct recycling of aluminum chip (AA6061) in hot press forging employing response surface methodology. *Procedia CIRP*. 2015 Jan 1;26:477-81.
- [12] Hong SH, Kim BK. Fabrication of aluminum flake powder from foil scrap by a wet ball milling process. *Materials letters*. 2001 Oct 31;51(2):139-43.
- [13] Hong SH, Lee DW, Kim BK. Manufacturing of aluminum flake powder from foil scrap by dry ball milling process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000 Apr 3;100(1):105-9.
- [14] Sherafat Z, Paydar MH, Ebrahimi R. Fabrication of Al7075/Al, two phase material, by recycling Al7075 alloy chips using powder metallurgy route. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009 Nov 13;487(1):395-9.
- [15] Handbook M. Vol. 7: Powder Metallurgy. American Society for Metals. 1984;57.
- [6] Wang M, Woo KD, Kim DK, Ma L. Study on de-coating used beverage cans with thick sulfuric acid for recycle. *Energy conservation and management*. 2007 Mar 31;48(3):819-25.
- [7] Sillekens WH, Sano T, Terasaki M, Matsuno K, Kals JA. Formability of recycled aluminium alloy 5017. *Journal of materials processing technology*. 1997 Mar 1;65(1-3):252-60.
- [8] Verran GO, Kurzawa U. An experimental study of aluminum can recycling using fusion in induction furnace. *Resources, Conservation and Recycling*. 2008 Mar 31;52(5):731-6.
- [9] Niero M, Olsen SI. Circular economy: to be or not to be in a closed product loop? A Life Cycle Assessment of aluminium cans with inclusion of alloying elements. *Resources, Conservation and Recycling*. 2016 Nov 30;114:18-31.
- [20] Schlesinger ME. Aluminum recycling. CRC Press; 2013 Dec 21.
- [2] Samuel M. A new technique for recycling aluminium scrap. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003 Apr 1;135(1):117-24.
- [22] George F. ASM Handbook: Volume 9: Metallography And Microstructures.
- [23] Brandstetter S, Derlet PM, Van Petegem S, Van Swygenhoven H, Williamson-Hall anisotropy in nanocrystalline metals: X-ray diffraction experiments and atomistic simulations. *Acta Materialia*. 2008 Jan 31;56(2):165-76.
- [24] Koch C, Ovid'ko I, Seal S, Veprek S. Structural nanocrystalline materials: fundamentals and applications. Cambridge University Press; 2007 May 31.
- [۲۵] سعید شیبانی، ابوالقاسم عطائی، غلامرضا خیاطی، سعید اسدی کوهنجان، آلیازسازی و فعال سازی مکانیکی فناوری تهیه نانو مواد، جهاد دانشگاهی، واحد تهران، ۱۳۸۶.
- [26] Intrater J. Mechanical alloying and milling, c. Suryanarayana.