

ساخت نانوذرات ترکیب بین فلزی $\gamma\text{-Cu}_5\text{Zn}_8$ به روش آلیاژسازی مکانیکی و آسیاکاری مکانیکی

فردین صفری*، رسول آذری خسروشاهی، اشکان ذوالریاستین و شاهرخ علی زاده

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۵/۰۲/۱۷، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۰۴/۱۰، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

چکیده

در این پژوهش ترکیب بین فلزی پیچیده نانوساختار $\gamma\text{-Cu}_5\text{Zn}_8$ به دو روش آلیاژسازی مکانیکی و آسیاکاری مکانیکی شمش پیش آلیاژ شده این ترکیب تهیه شده‌اند. به این منظور در روش آلیاژسازی مکانیکی پودر خالص عناصر مس و روی با نسبت وزنی مناسب برای تشکیل ترکیب Cu_5Zn_8 در زمان‌های مختلف توسط آسیاب گلوله‌ای پر انرژی آلیاژسازی مکانیکی شدند. در روش آسیاب مکانیکی نخست شمش پیش آلیاژ شده به روش ذوب و ریخته‌گری تحت اتمسفر کنترل شده تهیه و در ادامه بعد از تعیین ترکیب مناسب تحت عملیات خردایش قرار گرفته و آسیاکاری مکانیکی تحت زمان‌های مختلف صورت گرفت. بررسی آنالیز فازی و مورفولوژی پودرهای به دست آمده با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) صورت گرفته است. پس از انجام پرس، آزمایش سختی روی نمونه‌ها صورت گرفت. ارزیابی‌ها نشان داد که سختی نمونه‌های حاصل از آسیاب مکانیکی بعد از ۵۰ h آسیاکاری برابر $463/6 \text{ HV}$ می‌باشد، در حالی که سختی نمونه‌های آلیاژسازی شده برابر $432/3 \text{ HV}$ است.

واژه‌های کلیدی: ترکیب بین فلزی پیچیده، آلیاژسازی مکانیکی، آسیاکاری مکانیکی.

۱- مقدمه

یک آلیاژ یا یک فازی هستند که از عناصر تشکیل دهنده فلزی تشکیل شده‌اند. واژه آلیاژ فلزی بدین معنا نیست که این ترکیبات اساساً دارای خواص فلزات بوده و لیکن خواص آنها کاملاً متفاوت از مواد فلزی اجزا سازنده است. از ویژگی بارز آنها پیچیده بودن ساختار کریستالی آنهاست. این

آلیاژهای فلزی پیچیده (Complex metallic alloys) یا به عبارتی بهتر ترکیبات پیچیده بین فلزی از مواد کاملاً نوین در مهندسی مواد محسوب می‌گردند. این مواد یک ترکیب یا

* عهده‌دار مکاتبات: فردین صفری

نشانی: تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی مواد

تلفن: ۰۸۲۳۷۸۲۲۸-۴۱، دورنگار: ۰۸۲۳۷۸۲۲۸-۴۱، پست الکترونیکی: safarifardin0@gmail.com

ترکیب پیش آلیاژ شده در زمان‌های مختلف آسیاکاری می‌باشد. بررسی آنالیز فازی و مورفولوژی پودرهای به دست آمده با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) صورت گرفت. همچنین به منظور بررسی بیشتر پودرهای تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی و آسیاکاری مکانیکی آزمایش میکروسختی بر پودرها انجام پذیرفت.

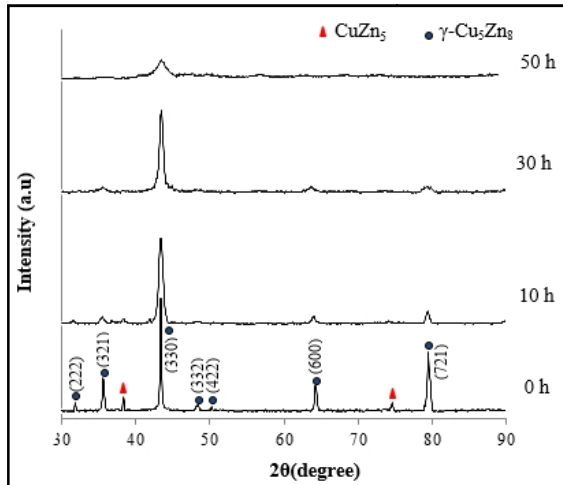
۲- فعالیت‌های تجربی

برای تولید ترکیب بین فلزی پیچیده γ -Cu₅Zn₈ به روش آسیاکاری مکانیکی، ابتدا ذوب و آلیاژسازی از شمش روی خالص تجاری با خلوص ۹۹/۷٪ و مس خالص تجاری با خلوص ۹۹/۹٪ صورت گرفت. در این تحقیق نخست شمش مس در دمای ۱۱۰۰ °C در کوره الکتریکی با اتمسفر کنترل شده ذوب گردید و سپس قطعات روی (با توجه به اتلاف ناشی از سوختن روی) تحت پوشش گاز آرگون به داخل مذاب مس اضافه و هم زده شد تا آلیاژ همگن به دست آید. پس از تعیین ترکیب مناسب برای تولید شمش تک فاز γ -Cu₅Zn₈، شمش ریخته‌گری شده توسط هاون برنجی خرد تا پودر اولیه ترکیب مورد نظر بدست آید. در ادامه برای تولید نانو پودر از پودر اولیه پیش آلیاژ شده، از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای (مدل FP2 ساخت شرکت فرا پژوهش نقش جهان) در سیکل‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ ساعت با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۲ به ۱ با سرعت چرخش آسیاب ۲۵۰ rpm در حضور ۵ درصد وزنی متانول استفاده گردید. به منظور تعیین ریزسختی سطح نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌ها پرس سرد شده، سپس در دمای ۳۳۰ °C تحت عملیات آتیل قرار گرفته و در نهایت توسط سمباده نرم صاف و سپس پولیش شد. به منظور تولید ترکیب بین فلزی پیچیده γ -Cu₅Zn₈ به روش آلیاژسازی مکانیکی، نخست محفظه آسیاب به مدت یک ساعت توسط مخلوطی از اتانول و پودر سنباده به همراه گلوله‌های آسیاب شارژ شده تمیز

ترکیبات به دلیل داشتن ساختار پیچیده که منجر به ایجاد خواص مطلوبتری از فیزیکی و مکانیکی می‌گردد از جنبه‌های مختلف علم و فناوری مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱،۲].

یکی از تقویت کننده‌های جدیدی که می‌تواند در کامپوزیت پایه مسی به کار رود، ترکیب پیچیده بین فلزی γ -Cu₅Zn₈ می‌باشد. ترکیب بین فلزی γ -Cu₅Zn₈ یک فاز پیچیده هیوم-روتاری و با نسبت الکترون به اتم ۲۱ به ۱۳ می‌باشد [۳]. فاز گاما دارای یک ساختار bcc است که دارای یک خوشه با ۲۶ اتم می‌باشد که این خوشه‌ها مرکز و گوشه‌های ساختار bcc را اشغال می‌نماید [۴]. فاز γ با ترکیب Cu₅Zn₈ در کنار دیگر فازها و آلیاژها در دیاگرام فازی Cu-Zn در محدوده ترکیبی ۶۷-۵۷ wt.% Zn دیده می‌شود، پارامتر شبکه این فاز در حدود ۰/۸۸۷ nm و چگالی برابر ۸/۰۴۷ g/cm³ است. ترکیب بین فلزی γ -Cu₅Zn₈ دارای خواص ویژه‌ای چون ترشوندگی عالی و هدایت الکتریکی بالا می‌باشد که آن را از سایر ترکیبات بین فلزی متمایز می‌کند. مشکل اصلی این ترکیب تردی بیش از حد بوده است، براساس مطالعات صورت گرفته، شرایط لغزش دانه‌ها و چرخش دانه‌ها بر اثر کاهش اندازه دانه فراهم می‌شود و موجب بهبود انعطاف پذیری این ترکیبات می‌شود [۵-۷].

ساخت نانوذرات ترکیب γ -Cu₅Zn₈ به دو روش می‌تواند صورت گیرد که هر دو روش بر پایه متالورژی پودر می‌باشد. روش اول ساخت این ترکیب بین فلزی CMA به وسیله انجام آسیاکاری مکانیکی (Mechanical Milling) بر شمش از پیش آلیاژ شده‌ای ترکیب (هدف ریز شدن ذرات و رسیدن به ابعاد نانومتری) و روش دوم به وسیله آلیاژسازی مکانیکی (Mechanical Alloying) (هدف فرآیند نخست آلیاژ شدن و تشکیل لایه‌های نفوذی مس و روی و دیگری ریز شدن ذرات و رسیدن به ابعاد نانومتری) می‌باشد [۸-۱۰]. هدف از این پژوهش، مطالعه مخلوط پودری مس و روی با ترکیب شیمیایی نزدیک به ترکیب استوکیومتری به وسیله فرآیند آلیاژسازی مکانیکی و روش آسیاکاری مکانیکی



شکل ۱: الگوی پراش اشعه ایکس شمش ریخته شده در زمان‌های مختلف آسیابکاری مکانیکی.

پهنای پیک افزایش یابد [۱۱]. با افزایش زمان آسیابکاری تا ۵۰ h، خطوط پراش پهن‌تر شده ولی تغییر محسوسی در موقعیت پیک‌ها مشاهده نمی‌شود که نشان دهنده ریز شدن دانه‌ها به طور قابل ملاحظه می‌باشد.

شکل ۲ الگوی پراش پرتو ایکس γ - Cu_5Zn_8 را در زمان‌های مختلف آلیاژسازی مکانیکی نشان می‌دهد. با گذشت ۱۰ h از زمان آلیاژسازی، از آنجایی که شعاع اتمی مس ۰/۱۲۸ nm و شعاع اتمی روی ۰/۱۳۳ nm می‌باشد، سرعت نفوذ مس در روی بسیار بیشتر از سرعت نفوذ روی در مس می‌باشد، بنابراین با توجه به میل ترکیبی بالای مس و روی در سیستم دوتایی Cu-Zn، شرایط برای تشکیل فاز Cu_5Zn_8 فراهم می‌باشد. در واقع علت تشکیل زود هنگام فازهای غنی از روی همچون فازهای ϵ - CuZn_5 و γ - Cu_5Zn_8 در مراحل اولیه آلیاژسازی را می‌توان به سرعت نفوذ بسیار بالای مس در روی در مقایسه با سرعت نفوذ روی در مس نسبت داد [۱۲]. همانطور که مشاهده می‌شود با گذشت ۳۰ h از زمان آسیابکاری پیک‌های مربوط به ترکیب ϵ - CuZn_5 در حال ناپدید شدن هستند. علاوه بر این موضوع شدت پیک‌های اشعه ایکس کاهش یافته و پهنای آنها نیز افزایش یافته است، که علت پهن شدن پیک‌ها را می‌توان به اثر انباشتگی ناشی از اصلاح دانه‌ها و کرنش شبکه‌ای مربوط دانست. در ادامه با گذشت ۵۰ h آلیاژسازی مکانیکی، پیک‌های غالب مربوط

می‌گردد. در ادامه میزان ۲۰ گرم مخلوط پودر روی با درصد وزنی ۶۵٪ و مس با درصد وزنی ۳۵٪ به همراه ۱۲ برابر وزنی گلوله آسیاب کننده با دو اندازه ۶ و ۱۰ میلی‌متری با نسبت ۱ به ۲ و همچنین پنج درصد وزنی متانول به عنوان PCA در دستگاه شارژ شده و محفظه دستگاه از هوا تخلیه و توسط گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ پر گردید. آسیابکاری با سرعت گردش سیکلی ۲۵۰ rpm برای فواصل زمانی ۱۰، ۳۰ و ۵۰ ساعت انجام پذیرفت. در این میان بررسی‌های فازی و ریزساختاری بر پودر برای رسیدن به نانوپودر ترکیب CMA انجام پذیرفت.

آنالیز فازی و مورفولوژی پودرهای به دست آمده با استفاده از دستگاه آنالیز پراش اشعه ایکس مدل ADVANCE-BRUCKERS AXS D8 و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل OXFORD در ولتاژ ۳۰ kV استفاده گردید. همچنین جهت به دست آوردن اندازه ذرات از میکروسکوپ الکترونی عبوری با ولتاژ ۱۰۰ kV تحت نام ساخت ZEISS ساخت کشور آلمان استفاده شد. میکروسختی نمونه‌ها نیز توسط دستگاه میکروسختی سنج مدل LEITZ ساخت آلمان که محدوده بار آن ۵ تا ۵۰۰ گرم است، اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

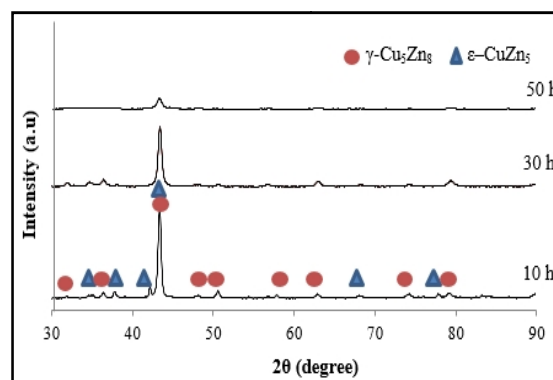
شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به آسیابکاری مکانیکی شمش ریخته شده در زمان‌های مختلف ۱۰، ۳۰ و ۵۰ h را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با گذشت ۱۰ h از آسیابکاری مکانیکی شدت پیک‌های پراش اشعه ایکس به شدت کاهش یافته است و پهنای آنها افزایش یافته‌اند. به دلیل تردی این ترکیب بین فلزی اندازه ذرات و کریستال‌ها به سرعت کاهش یافته بنابراین عواملی نظیر کرنش شبکه‌ای در اینجا نقش برجسته‌ای نخواهند داشت. با توجه به مطالب گفته شده می‌توان گفت که به دلیل نرخ شکست بالایی که این دسته از ترکیبات از خود بروز می‌دهند، لذا انتظار داریم در هر مرحله شدت پیک کاهش و

جدول ۱: نتایج حاصل از محاسبات اندازه کریستالیت برای دو نمونه آسیاب مکانیکی شده و آلیاژسازی مکانیکی شده در زمان‌های مختلف آسیابکاری.

زمان آسیابکاری (h)	آسیابکاری مکانیکی (nm)	آلیاژسازی مکانیکی (nm)
۱۰	۷۸	۱۴۱
۳۰	۴۳	۸۹
۵۰	۲۸	۴۲

کریستالیت‌ها به ۲۸ nm رسیده است. به طور کلی نتایج حاصل از محاسبه اندازه دانه‌های کریستالی نشان می‌دهد که با افزایش زمان آسیابکاری گرچه میزان کرنش شبکه افزایش یافته و اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد ولی نرخ افزایش کرنش شبکه و کاهش اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش نرخ افزایش کرنش شبکه و کاهش اندازه دانه‌ها می‌تواند به چند دلیل باشد: اول اینکه با افزایش زمان آسیاب کردن و افزایش سطح ویژه نمونه، تمایل به آگلومره شدن ذرات در حین آسیاب کردن افزایش می‌یابد و انرژی آسیابکاری بیشتر صرف شکستن آگلومره‌های تشکیل شده می‌گردد. دلیل دوم اینکه با افزایش زمان آسیابکاری دمای محفظه آسیاب افزایش یافته و این افزایش دما می‌تواند منجر به بازیابی مجدد در حین آسیابکاری گردد.

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه پودری پرس شده در زمان‌های مختلف آسیابکاری مکانیکی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود با شروع عملیات آسیاب شدن به دلیل تردی این ترکیب بین‌فلزی اندازه ذرات تا حدود کمتر از ۲ μm کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل ترد بودن ترکیب بین‌فلزی Cu₅Zn₈ می‌باشد. در واقع به دلیل اینکه شمش مورد نظر در ابتدای فرآیند آسیابکاری دارای ترکیب تردی بوده است، با شروع آسیابکاری و با توجه به اینکه نرخ شکست خیلی بیشتر از نرخ جوش سرد می‌باشد لذا در مراحل اولیه آسیابکاری به شدت اندازه ذرات کاهش می‌یابد. همچنین در طی این مدت مورفولوژی شکل ذرات تقریباً به صورت شبه کروی می‌باشد [۱۵-۱۳]. با افزایش زمان آسیابکاری به ۳۰ h



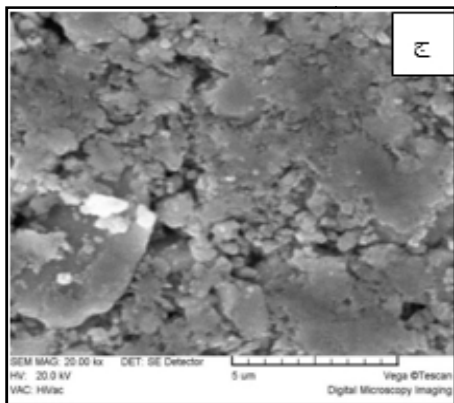
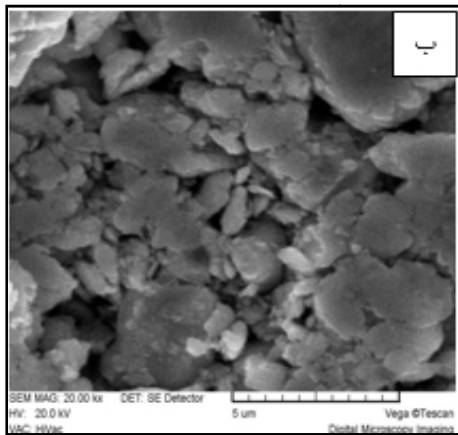
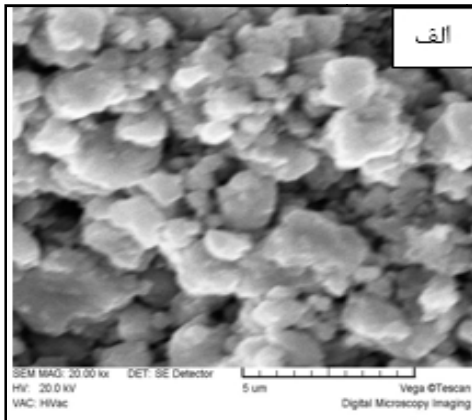
شکل ۲: الگوی پراش اشعه ایکس مخلوط پودری مس و روی پس از ۱۰، ۳۰ و ۵۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی.

به فاز Cu₅Zn₈ می‌باشند و شدت پیک‌های فازهای انتقالی به کمترین مقدار خود رسیده‌اند. همانطور که مشخص است بعد از ۵۰ h آلیاژسازی شدت پیک‌ها کاهش و پهنای پیک‌ها افزایش یافته است که نشان از ریزدانه شدن فاز Cu₅Zn₈ بعد از ۵۰ h آلیاژسازی مکانیکی می‌باشد. یکی از روابطی که در محاسبه اندازه دانه‌های کریستالی و کرنش‌های شبکه از روی پهنای پیک کاربرد فراوانی دارد، رابطه ویلیامسون-هال می‌باشد. تفاوت روش ویلیامسون-هال با روش محاسبه شرر دخیل کردن اثر کرنش در رابطه محاسبه اندازه کریستال می‌باشد و به همین دلیل نسبت به روش شرر دقیق‌تر است و اندازه دانه حاصل از این روش در مقایسه با روش شرر بزرگتر است. رابطه ویلیامسون-هال به فرم زیر می‌باشد:

$$\beta \cos \theta = \frac{0.94\lambda}{d} + \varepsilon \sin \theta \quad (1)$$

در رابطه β پهنای پیک در نیمه ارتفاع آن (بر حسب رادیان)، λ طول موج اشعه ایکس، d اندازه دانه، θ زاویه پراگ و ε کرنش شبکه می‌باشد [۱۱]. جدول ۱ نتایج حاصل از محاسبات اندازه کریستالیت برای دو نمونه آسیابکاری مکانیکی و آلیاژسازی مکانیکی را نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی بعد از ۵۰ h آسیابکاری اندازه کریستالیت‌ها به ۴۲ nm رسیده است، در حالی که برای فرآیند آسیابکاری مکانیکی اندازه



شکل ۳: مخلوط ذرات آسیاکاری شده پرس شده پس از (الف) ۱۰ h آسیاکاری، (ب) ۳۰ h آسیاکاری و (ج) ۵۰ h آسیاکاری.

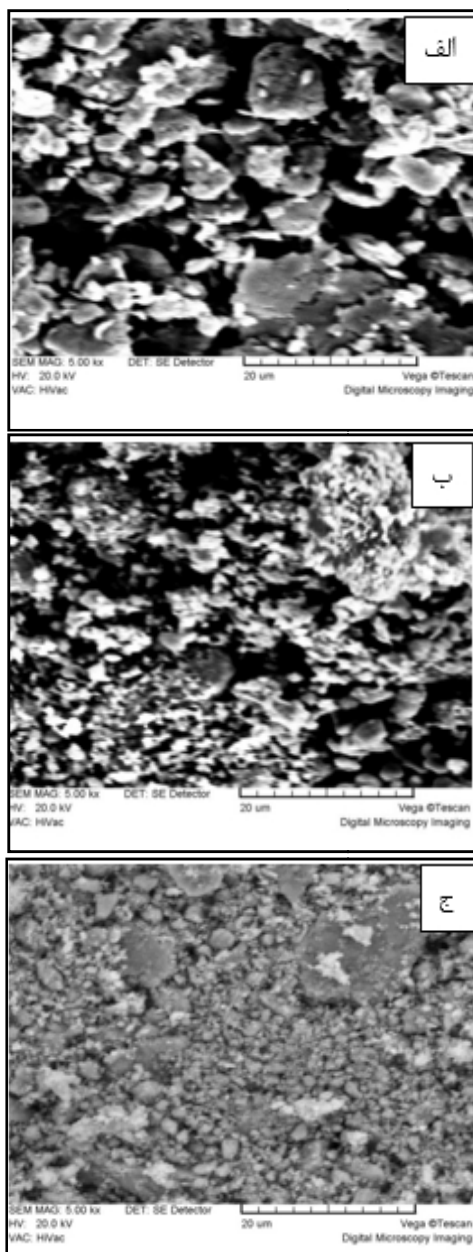
به منظور بررسی بیشتر پودرهای تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی و همچنین آسیاکاری مکانیکی، آزمایشات میکروسختی بر پودرهای پرس شده انجام پذیرفت که نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که دیده می شود ارتباط قابل توجهی میان ریزساختار به دست آمده

(شکل ۳-ب) اندازه ذرات به حدود $1 \mu\text{m}$ کاهش می یابد و در نهایت با رسیدن زمان آسیاب به ۵۰ h (شکل ۳-ج) نانوذرات ترکیب Cu_5Zn_8 به صورت خوشه های آگلومره شده با اندازه در حدود 500 nm حاصل می گردد. علامت موجود در تصویر به خوشه های آگلومره شده نانوذرات Cu_5Zn_8 اشاره دارد.

شکل ۴ نیز تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نمونه ۵۰ h آسیاکاری مکانیکی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود پودرهای آسیاب مکانیکی شده به ندرت دارای شکل ظاهری کاملاً کروی هستند و اندازه آنها در حدود 120 nm می باشد.

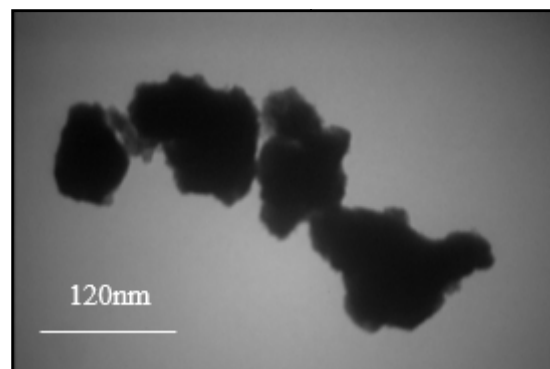
شکل ۵-الف تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات پودر در زمان های مختلف آلیاژسازی مکانیکی را نشان داده است. تصاویر مویب آن می باشد که پس از ۱۰ h آلیاژسازی مکانیکی، در اثر ضربه های دائم گلوله ها تغییر فرم زیادی در ذرات ایجاد شده و باعث کاهش اندازه ذرات تا حدود $5 \mu\text{m}$ گردیده است. این تغییر فرم زیاد توسط نواقص بلوری گوناگون مانند نابجایی ها، جای خالی ها و افزایش تعداد مرزانه ها ایجاد می شود. همچنین با توجه به اجزای انعطاف پذیر سیستم، فرآیند میکروفرفرژینگ باعث مورفولوژی ورقه ای شکل در اجزای سیستم می شود. با افزایش زمان آلیاژسازی به ۳۰ h (شکل ۵-ب) فرآیند آگلومره شدن ذرات را شاهد می باشیم که به دلیل افزایش انرژی سطحی ذرات ریز شده در حین فرآیند آلیاژسازی مکانیکی می باشد. بر مبنای این تصاویر با افزایش زمان فرآیند آلیاژسازی تا ۳۰ h ذرات پودری آگلومره شده و اندازه این آگلومره ها در حدود $3 \mu\text{m}$ می باشد.

با ادامه آلیاژسازی تا زمان ۵۰ h (شکل ۵-ج) به نظر می رسد که نیروی ضربه ای اعمال شده از گلوله های آسیاب به ذرات پودری، سبب کارسختی و شکست ذرات پودری شده و نهایتاً منجر به کاهش اندازه ذرات پودری شده است. در این تصاویر نیز اندازه پودرهای آگلومره در محدوده وسیعی از 500 nm تا $1 \mu\text{m}$ قرار دارند.



شکل ۵: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پس از،
الف) ۱۰ h آلیاژسازی مکانیکی، ب) ۳۰ h آلیاژسازی
مکانیکی و ج) ۵۰ h آلیاژسازی مکانیکی.

در واقع با توجه به رابطه هال-پیچ می توان این نتیجه را گرفت از آنجایی که اندازه دانه رابطه معکوسی با سختی دارد، بنابراین با توجه به نتایج اخیر می توان گفت که در هر دو روش آلیاژسازی مکانیکی و آسیاکاری مکانیکی سختی ترکیب مورد نظر در مقایسه با سختی شمش اولیه بیشتر می باشد.



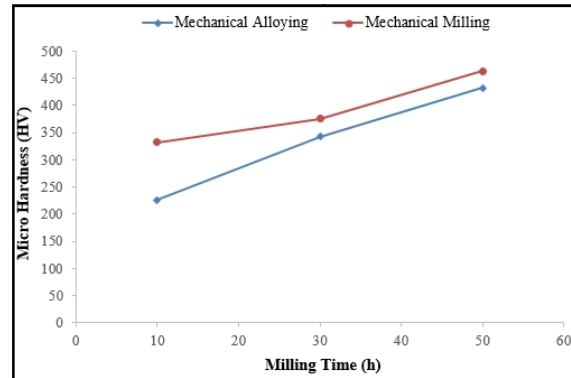
شکل ۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری
از نمونه ۵۰ h آسیاکاری شده.

و نتایج سختی وجود دارد. با توجه به اینکه ترکیب شمش به دست آمده در محدوده ترکیب Cu_5Zn_8 قرار دارد، بنابراین یک افزایش ناگهانی سختی را تا مقدار $332/4$ HV در همان مراحل اولیه آسیاکاری مشاهده می کنیم که ناشی از ترد بودن ترکیب Cu_5Zn_8 می باشد. با توجه به اینکه در ترکیبات ترد نرخ شکست بیشتر از نرخ جوش ذرات در آسیاکاری مکانیکی می باشد، لذا روند افزایش سختی تا مقدار HV $375/9$ را تا سیکل ۳۰ h نیز مشاهده می شود. ادامه آسیاکاری تا ۵۰ h باعث افزایش سختی تا مقدار $463/6$ HV می شود. علت افزایش سختی در این مرحله مربوط به ریز شدن دانه های Cu_5Zn_8 تا حد نانومتری می باشد بنابراین پودر نانوساختار Cu_5Zn_8 تولید شده دارای اندازه دانه های 28 nm و سختی بالای $463/6$ HV (در مقایسه با شمش پیش آلیاژ شده Cu_5Zn_8 با سختی 405 HV) می باشد.

در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی، با افزایش زمان در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی تا سیکل ۱۰ h تغییر کمی در سختی نمونه ها دیده می شود. اما پس از ۳۰ h آلیاژسازی مکانیکی سختی نمونه ها افزایش یافته است. علت افزایش سختی در این مرحله از آلیاژسازی مکانیکی تشکیل ترکیب بین فلزی Cu_5Zn_8 می باشد که در مقایسه با پودرهای اولیه مس و روی دارای سختی بالاتری می باشد. ادامه آلیاژسازی مکانیکی تا ۵۰ h باعث افزایش سختی تا مقدار $432/3$ HV می شود. علت افزایش سختی در این مرحله نیز مربوط به ریز شدن دانه های Cu_5Zn_8 تا حد 42 nm می باشد.

اندازه ذرات کریستالی به دست آمده در مرحله نهایی بعد از ۵۰ h آسیاکاری مکانیکی (۲۸ nm) ریزتر از اندازه ذرات به دست آمده در مرحله نهایی آلیاژسازی مکانیکی (۴۲ nm) است.

با توجه به اندازه ذرات به دست آمده پس از ۵۰ h، سختی نمونه‌های آسیاکاری مکانیکی (۴۶۳/۶ HV) بیشتر از نمونه‌های آلیاژسازی مکانیکی (۴۳۲/۳ HV) است.



شکل ۶: تغییرات سختی با گذشت زمان.

مراجع

- [1] K. Urban, M. Feuerbacher, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **334**, 2004, 143.
- [2] E. Belin-Ferre, "Basic of thermodynamics and phase transitions in complex intermetallics", World Scientific Publishing Co, France, 2008.
- [3] N.K. Mukhopadhyaya, D. Mukherjee, S. Bera, I. Manna, *Materials Science and Engineering A*, **485**, 2008, 673.
- [4] O. Gourdon, D. Gout, D.J. Williams, T. Proffen, S. Hobbs, G.J. Miller, *Inorg. Chem.*, **46**, 2007, 251.
- [5] C. Suryanarayana, *Progress in Materials Science*, **46**, 2001, 1.
- [6] C.C. Koch, "Nanostructured materials processing, properties and applications", William Andrew, Norwich 2002.
- [7] A. Kroupa, J. Vrestal, P. Boulet, A. Dinsdale, A. Watson, M-Ch. Record, *Calphad*, **51**, 2015, 369.
- [8] I. Jung, I. Gicho, H. Molee, *Journal of Electronic Materials*, **38**, 2009, 11.
- [9] Z. Ke-sheng, X. Sheng, Z. Jing, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **1**, 2009, 1206.
- [10] M. Farbod, A. Mohammadian, *Intermetallics*, **45**, 2014, 1.
- [11] S.K. Pabi, J. Joardar, B.S. Murty, *Journal of Material Science*, **31**, 1996, 3207.
- [12] T. Venugopal, K.P. Rao, B.S. Murty, *Acta Materialia*, **55**, 2007, 4439.
- [۱۳] بهمن نصیری تبریزی، رضا ابراهیمی کهریزسنگی، علی شکوه‌فر، "بهبود مشخصات ساختاری نانوذرات هیدروکسی آپاتیت تولید شده به روش مکانوشیمیایی با استفاده از محفظه‌های پلیمری"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، شماره ۵، ۱۳۸۷، ۱۹-۲۴.
- [14] N. Nemati, R. Khosroshahi, M. Emamy, A. Zolriasatein, *Materials & Design Volume*, **32**, 2011, 3718.
- [۱۵] اشکان ذوالریاستین، رسول آذری خسروشاهی، مسعود امامی، نرگس نعمتی، "ساخت و بررسی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت جدید زمینه آلومینیمی تقویت شده با نانوذرات ترکیب پیچیده بین فلزی β -Al₃Mg₂"، پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران، اصفهان، ۱۳۹۰.

$$H \propto d^{-\frac{1}{2}} \quad (۲)$$

در این پژوهش افزایش قابل توجهی در سختی مشاهده می‌شود که مربوط به نانو ساختار شدن این ترکیب بین فلزی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش سختی در نمونه‌های آلیاژسازی مکانیکی شده شیب تندتری نسبت به نمونه‌های آسیاکاری مکانیکی دارا است. علت اصلی این امر آلیاژی شدن و تشکیل لایه‌های نفوذی مس و روی و وقوع نفوذ بلند دامنه در اثر انجام عملیات آلیاژسازی مکانیکی می‌باشد [۱۴-۱۵].

۴- نتیجه گیری

روش آلیاژسازی و آسیاکاری مکانیکی می‌تواند به طور موفقیت آمیزی جهت تولید ترکیبات بین فلزی نانو ساختار نظیر ترکیب دوتایی Cu₅Zn₈ مورد استفاده قرار گیرد. نتایج حاصل از بررسی‌های الگوهای تفرق اشعه ایکس نشان می‌دهد که پس از ۵۰ h انجام فرآیند آلیاژسازی مکانیکی و آسیاکاری مکانیکی ترکیب نانو ساختار Cu₅Zn₈ به عنوان فاز غالب تشکیل شده است.