www.jnm.iau-shahrood.ac.ir
نانومواد: ۲۶:۸ (۱۳۹۵) ۱۱۳-۱۰۷

ساخت نانوذرات ترکیب بین‌فلزی γ-Cu_5Zn_8 به روش آلیاژسازی مکانیکی و آسیاکاری مکانیکی

فردین صفری*، رسول آذری خسروشاهی، اشکان ذوالریاستین و شاهرخ علی‌زاده

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 بین‌فلزی پیچیده نانوساختار γ-Cu_5Zn_8 به دو روش آلیاژسازی مکانیکی و آسیاکاری مکانیکی شمش پیش‌آلیاژ 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 پیش‌آلیاژ 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 h ۵۰ آسیاکاری برابر HV ۴۶۳/۶ می‌باشد، در حالی که سختی نمونه‌های آلیاژسازی شده برابر HV ۴۳۲/۳ است.

***واژه‌های کلیدی:* ترکیب بین‌فلزی پیچیده، آلیاژسازی مکانیکی، آسیاکاری مکانیکی.**

۱- مقدمه

آلیاژهای فلزی پیچیده (Complex metallic alloys) یا به عبارتی بهتر ترکیبات پیچیده بین‌فلزی از مواد کاملا نوین در مهندسی مواد محسوب می‌گردند. این مواد یک ترکیب یا یک آلیاژ یا یک فازی هستند که از عناصر تشکیل دهنده فلزی تشکیل شده‌اند. واژه آلیاژ فلزی بدین معنا نیست که این ترکیبات اساسا دارای خواص فلزات بوده و لیکن خواص آنها کاملا متفاوت از مواد فلزی اجزا سازنده است. از ویژگی بارز آنها پیچیده بودن ساختار کریستالی آنهاست. این

* **عهده‌دار مکاتبات:** فردین صفری
نشانی: تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی مواد
تلفن: ۸۲۳۷۸۲۲۸-۴۱، **دورنگار:** ۸۲۳۷۸۲۲۸-۴۱، **پست الکترونیکی:** safarifardin0@gmail.com

ترکیبات به دلیل داشتن ساختار پیچیده که منجر به ایجاد خواص مطلوبتری از فیزیکی و مکانیکی می گردد 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 بین‌فلزی γ-Cu_5Zn_8 می‌باشد. ترکیب بین فلزی γ-Cu_5Zn_8 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 Cu_5Zn_8 در کنار دیگر فازها و آلیاژها در دیاگرام فازی Cu-Zn در محدوده ترکیبی ۵۷-۶۷ wt.% Zn دیده می‌شود، پارامتر شبکه این فاز در حدود ۰/۸۸۷ nm و چگالی برابر ۸/۰۴۷ g/cm^3 است. ترکیب بین‌فلزی γ-Cu_5Zn_8 دارای خواص ویژه‌ای چون ترشوندگی عالی و هدایت الکتریکی بالا می‌باشد که آن را از سایر ترکیبات بین‌فلزی متمایز می کند. 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 انعطاف‌پذیری این ترکیبات می‌شود [۵-۷].

ساخت نانوذرات ترکیب γ-Cu_5Zn_8 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 پیش‌آلیاژ 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 لایه های 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 ترکیب پیش‌آلیاژ شده درزمان‌های 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

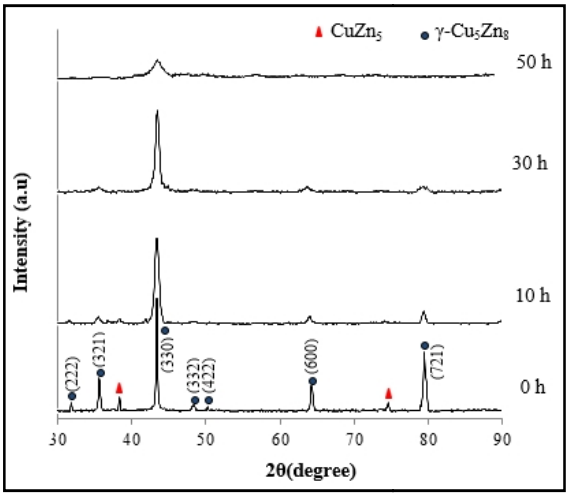
برای تولید ترکیب بین‌فلزی پیچیده γ-Cu_5Zn_8 به روش آسیاکاری مکانیکی، ابتدا ذوب وآلیاژسازی از شمش روی خالص تجاری با خلوص ۹۹/۷٪ و مس خالص تجاری با خلوص ۹۹/۹٪ صورت گرفت. در این تحقیق نخست شمش مس در دمای ۱۱۰۰ °C در کوره الکتریکی با اتمسفر کنترل شده ذوب گردید و سپس قطعات روی (با توجه به اتلاف ناشی از سوختن 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-Cu_5Zn_8، شمش ریخته‌گری شده توسط هاون برنجی خرد تا پودر اولیه ترکیب مورد نظر بدست آید. در ادامه برای تولید نانوپودر 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 ریزسختی‌سنجی سطح نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌ها پرس سرد شده، سپس در دمای ۳۳۰ °C تحت عملیات آنیل قرار گرفته و در نهایت توسط سمباده نرم صاف و سپس پولیش شد. به منظور تولید ترکیب بین‌فلزی پیچیده γ-Cu_5Zn_8 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

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. آسیاکاری 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 ZEISS ساخت کشور آلمان استفاده شد. میکروسختی نمونه‌ها نیز توسط دستگاه میکروسختی‌سنج مدل LEITZ ساخت آلمان که محدوده بار آن ۵ تا ۵۰۰ گرم است، اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

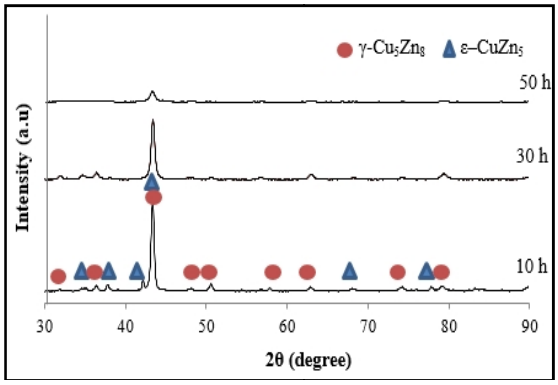
شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به آسیاکاری مکانیکی شمش ریخته شده در زمان‌های مختلف ۱۰، ۳۰ و ۵۰ h را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با گذشت ۱۰ h از آسیاکاری مکانیکی شدت پیک‌های پراش اشعه ایکس به شدت کاهش یافته است و پهنای آنها افزایش یافته‌اند. به دلیل تردی این ترکیب بین‌فلزی اندازه ذرات و کریستال‌ها 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



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

پهنای پیک افزایش یابد [۱۱]. با افزایش زمان آسیاکاری 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 آسیاکاری 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



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

به فاز Cu_5Zn_8 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 Cu_5Zn_8 بعد از ۵۰ h آلیاژسازی مکانیکی می‌باشد.

یکی از روابطی که در محاسبه اندازه دانه های کریستالی و کرنش های 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:

$$\beta\cos\theta = \frac{0.94\lambda}{d} + \varepsilon \sin\theta \qquad (۱)$$

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

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

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

زمان آسیاکاری (h)	آسیاکاری 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 آسیاکاری 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 دانه ها می تواند به چند دلیل باشد: اول اینکه با افزایش زمان آسیا کردن و افزایش سطح ویژه نمونه، تمایل به آگلومره شدن ذرات در حین آسیا کردن افزایش می یابد و انرژی آسیاکاری بیشتر صرف شکستن آگلومره‌های تشکیل شده می گردد. دلیل دوم اینکه با افزایش زمان آسیاکاری دمای محفظه آسیا افزایش یافته و این افزایش دما می‌تواند منجر به بازیابی مجدد در حین آسیاکاری گردد.

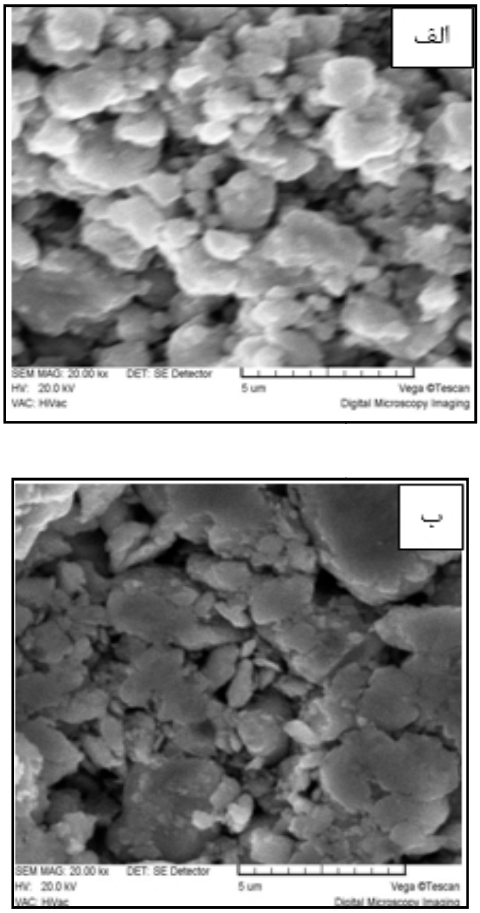
شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه پودری پرس شده در زمان‌های مختلف آسیاکاری مکانیکی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود با شروع عملیات آسیاب شدن به دلیل تردی این ترکیب بین‌فلزی اندازه ذرات تا حدود کمتر از ۲ μm کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل ترد بودن ترکیب بین‌فلزی Cu_5Zn_8 می‌باشد. در واقع به دلیل اینکه شمش مورد نظر در ابتدای فرآیند آسیاکاری دارای ترکیب تردی بوده است، با شروع آسیاکاری و با توجه به اینکه نرخ شکست خیلی بیشتر از نرخ جوش سرد می‌باشد لذا در مراحل اولیه آسیاکاری به شدت اندازه ذرات کاهش می‌یابد. همچنین در طی این مدت مورفولوژی شکل ذرات تقریبا به صورت شبه کروی می‌باشد [۱۵-۱۳]. با افزایش زمان آسیاکاری به ۳۰ h

(شکل۳-ب) اندازه ذرات به حدود µm ۱ کاهش می‌یابد و در نهایت با رسیدن زمان آسیاب به h ۵۰ (شکل۳-ج) نانوذرات ترکیب Cu_5Zn_8 به صورت خوشه‌های آگلومره شده با اندازه در حدود nm ۵۰۰ حاصل می‌گردد. علامت موجود در تصویر به خوشه‌های آگلومره شده نانوذرات Cu_5Zn_8 اشاره دارد.

شکل ۴ نیز تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نمونه h ۵۰ آسیاکاری مکانیکی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود پودرهای آسیاب مکانیکی شده به ندرت دارای شکل ظاهری کاملا کروی هستند و اندازه آنها در حدود nm ۱۲۰ می‌باشد.

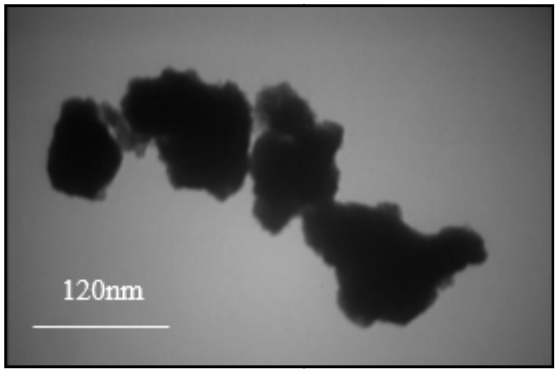
شکل ۵-الف تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات پودر در زمان‌های مختلف آلیاژسازی مکانیکی را نشان داده است. تصاویر موید آن می‌باشد که پس از h ۱۰ آلیاژسازی مکانیکی، در اثر ضربه‌های دائم گلوله‌ها تغییر فرم زیادی در ذرات ایجاد شده و باعث کاهش اندازه ذرات تا حدود µm ۵ گردیده است. این تغییر فرم زیاد توسط نواقص بلوری گوناگون مانند نابجایی‌ها، جای خالی‌ها و افزایش تعداد مرزدانه‌ها ایجاد می‌شود. همچنین با توجه به اجزای انعطاف‌پذیر سیستم، فرآیند میکروفرجینگ باعث مورفولوژی ورقه‌ای شکل در اجزای سیستم می‌شود. با افزایش زمان آلیاژسازی به h ۳۰ (شکل۵-ب) فرآیند آگلومره شدن ذرات را شاهد می‌باشیم که به دلیل افزایش انرژی سطحی ذرات ریز شده در حین فرآیند آلیاژسازی مکانیکی می‌باشد. بر مبنای این تصاویر با افزایش زمان فرآیند آلیاژسازی تا h ۳۰ ذرات پودری آگلومره شده و اندازه این آگلومره‌ها در حدود µm ۳ می‌باشد.

با ادامه آلیاژسازی تا زمان h ۵۰ (شکل ۵-ج) به نظر می‌رسد که نیروی ضربه‌ای اعمال شده از گلوله‌های آسیاب به ذرات پودری، سبب کارسختی و شکست ذرات پودری شده و نهایتا منجر به کاهش اندازه ذرات پودری شده است. در این تصاویر نیز اندازه پودرهای آگلومره در محدوده وسیعی از nm ۵۰۰ تا µm ۱ قرار دارند.



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

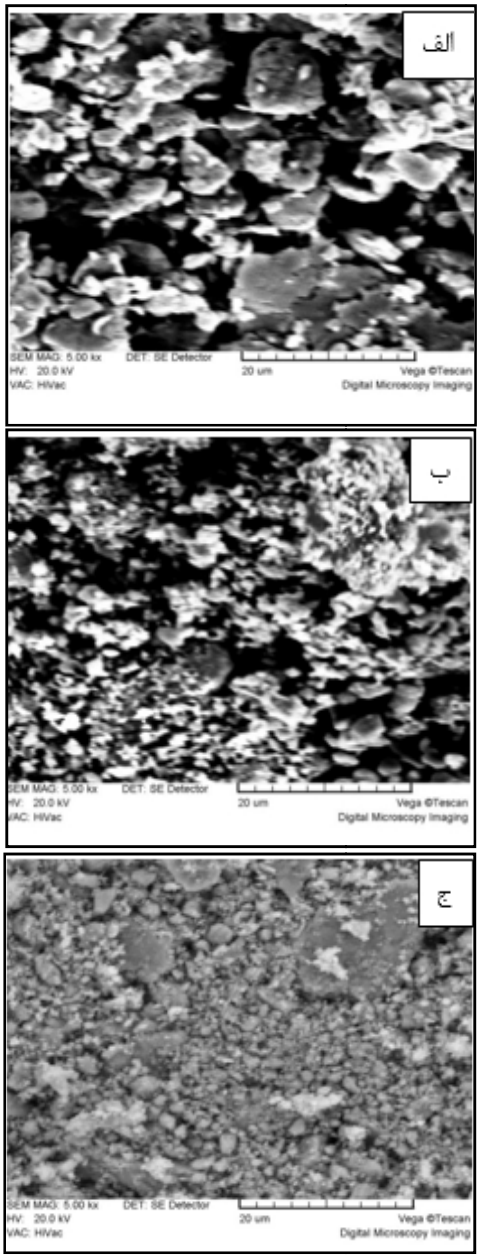
به منظور بررسی بیشتر پودرهای تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی و همچنین آسیاکاری مکانیکی، آزمایشات میکروسختی بر پودرهای پرس شده انجام پذیرفت که نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که دیده می‌شود ارتباط قابل توجهی میان ریزساختار به دست آمده



شکل ٤: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نمونه h ۵۰ آسیاکاری شده.

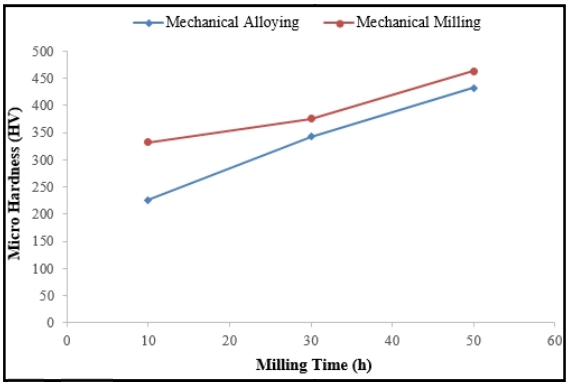
و نتایج سختی وجود دارد. با توجه به اینکه ترکیب شمش به دست آمده در محدوده ترکیب Cu_5Zn_8 قرار دارد، بنابراین یک افزایش ناگهانی سختی را تا مقدار HV ۳۳۲/۴ در همان مراحل اولیه آسیاکاری مشاهده می‌کنیم که ناشی از ترد بودن ترکیب Cu_5Zn_8 می‌باشد. با توجه به اینکه در ترکیبات ترد نرخ شکست بیشتر از نرخ جوش ذرات در آسیاکاری مکانیکی می‌باشد، لذا روند افزایش سختی تا مقدار HV ۳۷۵/۹ را تا سیکل h ۳۰ نیز مشاهده می‌شود. ادامه آسیاکاری تا h ۵۰ باعث افزایش سختی تا مقدار HV ۴۶۳/۶ می‌شود. علت افزایش سختی در این مرحله مربوط به ریز شدن دانه‌های Cu_5Zn_8 تا حد نانومتری می‌باشد بنابراین پودر نانوساختار Cu_5Zn_8 تولید شده دارای اندازه دانه‌های nm ۲۸ و سختی بالای HV ۴۶۳/۶ (در مقایسه با شمش پیش‌آلیاژ شده Cu_5Zn_8 با سختی HV ۴۰۵) می‌باشد.

در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی، با افزایش زمان در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی تا سیکل h ۱۰ تغییر کمی در سختی نمونه‌ها دیده می‌شود. اما پس از h ۳۰ آلیاژسازی مکانیکی سختی نمونه‌ها افزایش یافته است. علت افزایش سختی در این مرحله از آلیاژسازی مکانیکی تشکیل ترکیب بین فلزی Cu_5Zn_8 می‌باشد که در مقایسه با پودرهای اولیه مس و روی دارای سختی بالاتری می‌باشد. ادامه آلیاژسازی مکانیکی تا h ۵۰ باعث افزایش سختی تا مقدار HV ۴۳۲/۳ می‌شود. علت افزایش سختی در این مرحله نیز مربوط به ریز شدن دانه‌های Cu_5Zn_8 تا حد nm ۴۲ می‌باشد.



شکل ٥: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پس از، الف) h ۱۰ آلیاژسازی مکانیکی، ب) h ۳۰ آلیاژسازی مکانیکی و ج) h ۵۰ آلیاژسازی مکانیکی.

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



شکل ٦: تغییرات سختی با گذشت زمان.

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

در این پژوهش افزایش قابل توجهی در سختی مشاهده می‌شود که مربوط به نانوساختار شدن این ترکیب بین‌فلزی 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 [۱۵-۱۴].

٤- نتیجه‌گیری

روش آلیاژسازی و آسیاکاری مکانیکی می‌تواند به طور موفقیت‌آمیزی جهت تولید ترکیبات بین‌فلزی نانوساختار نظیر ترکیب دوتایی Cu_5Zn_8 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 نانوساختار Cu_5Zn_8 به عنوان فاز غالب تشکیل شده است.

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.

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، ۲۴_۱۹.

[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 نانوکامپوزیت جدید زمینه آلومینیمی تقویت شده با نانوذرات ترکیب پیچیده بین‌فلزی β-Al_3Mg_2"، پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران، اصفهان، ۱۳۹۰.