

## تعیین دمای بهینه سینتر در حضور فاز مایع برای تولید ماده مرکب تنگستن-مس

مهدی تقفی<sup>۱\*</sup>، بهروز قاسمی<sup>۱</sup>، ایمان بابایی‌نژاد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، سمنان، ایران

<sup>۲</sup>دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۲/۱۱/۱۷، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۴/۰۵/۰۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۰۵/۲۴

**چکیده** در این پژوهش، پودرهای تنگستن و مس خالص پس از مخلوط شدن به مدت یک ساعت در مخلوط‌کن، با فشار ۵۰۰ مگا پاسکال فشرده شدند. نمونه‌های فشرده شده، در کوره‌ای با اتمسفر هیدروژن خالص در دماهای ۱۱۵۰-۱۲۰۰-۱۳۰۰-۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت، سینتر در حضور فاز مایع شدند. ساختار و اندازه دانه پیش و پس از سینتر در حضور فاز مایع و چگالی، سختی و استحکام کششی نمونه‌های تولیدی پس از سینتر در حضور فاز مایع در دماهای مختلف بررسی شدند. نتایج نشان دهنده افزایش چگالی، سختی و استحکام با افزایش دما تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بودند و در ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، به علت افزایش تعداد حفره‌های بین ذرات تنگستن، خواص کاهش داشتند. مشاهده میکروسکوپی نمونه‌ها نشان داد که ریزساختارها، حفره‌های کشیده و عمیقی دارند.

**کلمات کلیدی:** تنگستن، مس، متالورژی پودر، سینتر در حضور فاز مایع، ماده مرکب.

## Study and Specification of Optimal Liquid Phase Sintering Temperature for Production of Tungsten-Copper Composite

Mahdi Saghafi<sup>\*1</sup>, Behrouz Ghasemi<sup>1</sup>, Iman Babaei Nejad<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of Semnan, Department of Material and Metallurgy Engineering, Semnan, Iran

<sup>2</sup> University of Malek Ashtar, Tehran, Iran

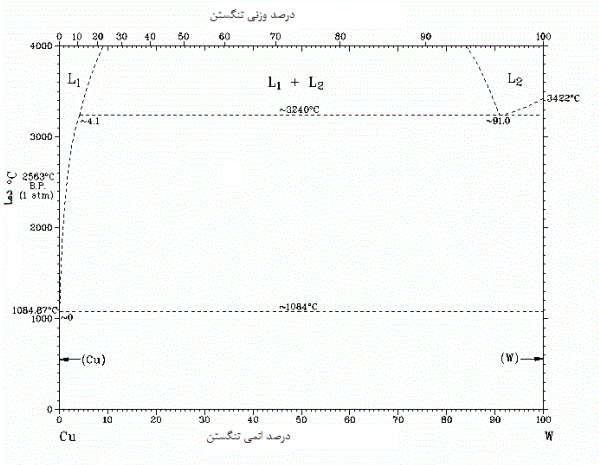
**Abstract** In this research, elemental powder mixture of pure tungsten and copper powders was prepared after 1 hr of mixing, and pressed under a load of 500 MPa. Samples from the pressed mixture were liquid phase sintered in a furnace under pure hydrogen atmosphere at different temperatures (1150-1200-1300-1400 °C) for 2 hrs. Structure, grain size, density, hardness and strength of produced samples after sintering were studied in different temperatures. Results showed that increasing in temperature up to 1300 °C results in increasing in density, hardness and strength. However, at 1400 °C due to extensive number of voids among tungsten particles, these properties were found to decrease. The microstructure was associated with wide and deep holes.

**Keywords:** Tungsten, Copper, Powder metallurgy, Liquid phase sintering, Composite.

\*عهده دار مکاتبات

## ۱- مقدمه

طی سالیان اخیر تحقیقات زیادی پیرامون سینتر در حضور فاز مایع و متغیرهای مربوط به سینتر در حضور فاز مایع انجام شده است. هدف این پژوهش بررسی و تعیین دمای بهینه سینتر در حضور فاز مایع و تاثیر تغییر دما بر چگالی و خواص مواد مرکب تنگستن- مس، در فشار و زمان بهینه است.



شکل ۱. نمودار فازی دوتایی تنگستن - مس [۳].

مواد مرکب به عنوان ترکیب‌کننده خواص مختلف شناخته می‌شوند و استفاده‌های فراوانی در طی دو دهه گذشته داشته‌اند [۱]. به دلیل ترکیب بی‌نظیر هدایت الکتریکی بالایی مس و ضریب انبساط حرارتی، سختی بالا، نقطه ذوب بالا، فشار بخار کم و مقاومت در برابر سایش بالایی تنگستن، مواد مرکب تنگستن- مس با داشتن خواصی شامل پایداری ابعادی، سختی بالا، چقرمگی و انعطاف‌پذیری بالا، سرعت عبور صوت مناسب، مقاومت به خوردگی و سایش، چگالی بالا و استحکام بالا، کاربردهای فراوانی یافته‌اند [۱-۳]. این مواد مرکب، به طور گسترده‌ای در صنایع الکترونیکی، صنایع نفت، صنایع هوا-فضا و کاربردهای گرمایی به کار گرفته شده‌اند که می‌توان به سامانه‌های ارتباطات ریزموج، کلیدهای قطع و اتصال جریان، اتصالات الکتریکی، جاذب‌های گرما در رایانه‌ها، الکترودهای جوشکاری مقاومتی، شکل‌دهی انفجاری و ... اشاره کرد [۴].

با توجه به شکل (۱)، به دلیل تفاوت زیاد بین نقطه ذوب مس ( $3422^{\circ}\text{C}$ ) و تنگستن ( $2563^{\circ}\text{C}$ )؛ نمی‌توان مواد مرکب تنگستن- مس را به روش ریخته‌گری تولید نمود و این مواد به صورت معمول از طریق متالورژی پودر تولید می‌شوند [۱ و ۳]. برطبق قوانین هیوم- روتری، به علت این که بین اندازه شعاع اتمی این دو فلز بیش از ۲۰٪ اختلاف وجود دارد و مس ساختار مکعبی با سطوح مرکزپر و تنگستن ساختار مکعبی مرکزپر دارد و همچنین به علت تفاوت زیاد بین الکترونگاتیویته مس (۱/۹) و تنگستن (۲/۳۶)، این دو فلز در یکدیگر حل نمی‌گردند. برطبق تحقیقات، این دو فلز برای حل شدن در هم به  $35\text{kJ/mol}$  انرژی نیاز دارند [۳ و ۵]. از این‌رو، این مواد مرکب، عمدتاً از طریق سینتر در حضور فاز مایع و یا فلزخورانی تولید می‌شوند که با توجه به محدودیت حلالیت این دو ماده در یکدیگر، در سینتر در حضور فاز مایع و فلزخورانی برای دستیابی به چگالی بالا از پودرهای ریز، زمان و دمای بالا و یا استفاده از عناصر فعال‌ساز مانند نیکل و آهن و ... استفاده می‌شود [۶].

## ۲- روش تحقیق

## ۲-۱- مشخصات مواد مصرفی

برای انجام آزمایش‌ها از پودرهای مس (تولید مرک آلمان) با درجه خلوص ۹۹/۹ درصد و اندازه متوسط ذرات حدود ۶ میکرومتر و تنگستن (تولید مرک آلمان) با اندازه متوسط ذرات کمتر از ۵ میکرومتر، با خلوص ۹۹ درصد (جدول ۱، میانگین تجزیه شیمیایی گرفته‌شده توسط پلاسما جفت شده القایی (ICP) - مدل ساخت شرکت Varian استرالیا) و پرتو ایکس فلورسانس (XRF) - مدل PW1480 ساخت شرکت فیلیپس هلند)) استفاده شد. شکل و مورفولوژی دو پودر که توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل ساخت شرکت TESCAN چک) گرفته شده، در شکل (۲) آمده است.

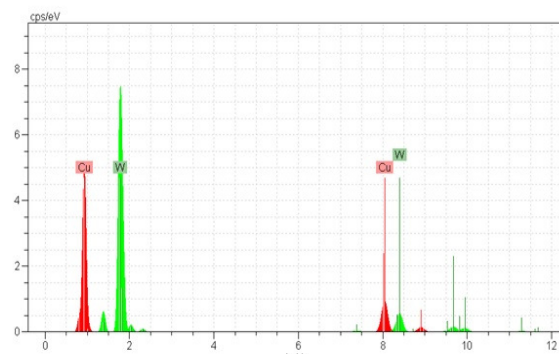
جدول ۱. میانگین تجزیه عنصری پودر تنگستن استفاده شده (برحسب درصد وزنی).

عنصر	Ti	S	Ca	Fe	Si	P	As	Mn	C	W
درصد میانگین	۰/۰۱	کمتر از ۰/۰۱	۰/۲۲۹۱	۰/۰۰۹۸	۰/۰۹۴	۰/۴۵۳۵	۰/۰۸۰۰	۰/۰۱۹۸	۰/۰۳	باقی مانده

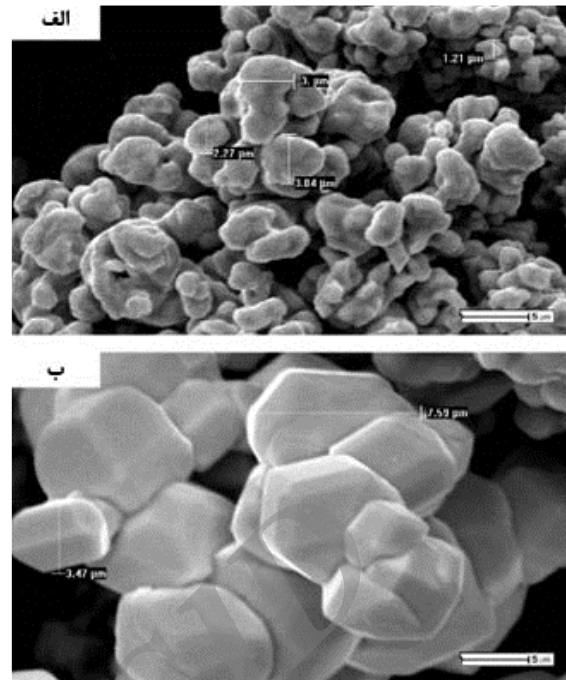
پس از سینتر در حضور فاز مایع، چگالی نمونه‌ها با استفاده از روش ارشمیدس اندازه‌گیری شد. برای مشاهده ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از ورق‌های سنباده ۸۰ تا ۳۰۰۰ سنباده زنی شدند و پس از پولیش برای مشاهده ریزساختار از محلول موراکامی (ASTM ۹۸ C) استفاده گردید. برای سختی‌سنجی نمونه‌ها از دستگاه سختی‌سنج یونیورسال و به روش برینل استفاده شد. در نهایت نمونه‌ها برای آزمون کشش با توجه به استاندارد ASTM E۸ ماشین‌کاری و با سرعت ۱/۲mm/min (با دستگاه مدل ۱۱۹۵ شرکت Instron کانادا) کشیده شدند.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی عنصری، مورفولوژی و ریزساختار پودر مخلوط شده که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده، در شکل‌های (۳) تا (۵) مشاهده می‌شود. همان‌طور که از شکل (۳) (تجزیه شیمیایی) استنباط می‌گردد، در اثر مخلوط کردن در مخلوط‌کن از جنس تنگستن کاربید، عناصر اصلی و عمده تشکیل دهنده پودر، تنگستن و مس هستند. با توجه به شکل‌های (۴) و (۵) در نمونه‌ای که یک ساعت مخلوط شده، به نظر می‌رسد توزیع و یکنواختی پودرها مناسب بوده و تقریباً مس و تنگستن به خوبی مخلوط شده‌اند و اندازه متوسط پودر مخلوط به مقدار ۳/۶۶ میکرومتر رسیده است. از ریزساختار نمونه می‌توان دریافت که اندازه دانه و مورفولوژی پودر نسبت به پودرهای مخلوط نشده، تغییر محسوسی نداشته و همچنان در گونه پودر با دو شکل متفاوت دیده می‌شوند.



شکل ۳. تجزیه شیمیایی پودرهای تنگستن - ۳۰ درصد مس مخلوط شده به مدت یک ساعت.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، نشان‌دهنده مورفولوژی و اندازه دانه الف) تنگستن، ب) مس.

### ۲-۲- مراحل انجام آزمایش‌ها

در مرحله اول پودرهای تنگستن و مس با نسبت وزنی ۷۰ به ۳۰، در دستگاه مخلوط‌کن دو کفه‌ای به مدت زمان ۱ ساعت، با سرعت ۱۲۰rpm مخلوط شدند. برای بررسی یکنواخت بودن مخلوط از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل ESEM ۳۰ XL ساخت هلند) مجهز به طیف‌سنج تفکیک انرژی پرتوایکس استفاده شد.

برای فشردن پودر از دستگاه پرس ایزواستاتیک سرد استفاده شد. مقدار ۱۲۵ گرم از پودرهای مخلوط شده به درون قالبی استوانه‌ای شکل ریخته و با فشار ۵۰۰MPa فشرده شدند. پس از فشردن، چگالی آن با روش ارشمیدس اندازه‌گیری گردید.

برای بررسی تأثیر دماهای متفاوت سینتر در حضور فاز مایع بر روی خواص، نمونه‌های فشرده شده در کوره با اتمسفر هیدروژن خالص و سرعت ورود هیدروژن ۱lit/min قرار داده شدند. دمای کوره با سرعت گرمایش ۱۰°C/min به دماهای ۱۱۵۰-۱۲۰۰-۱۳۰۰-۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد رسانده و نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در این دماها در حضور فاز مایع سینتر شدند.

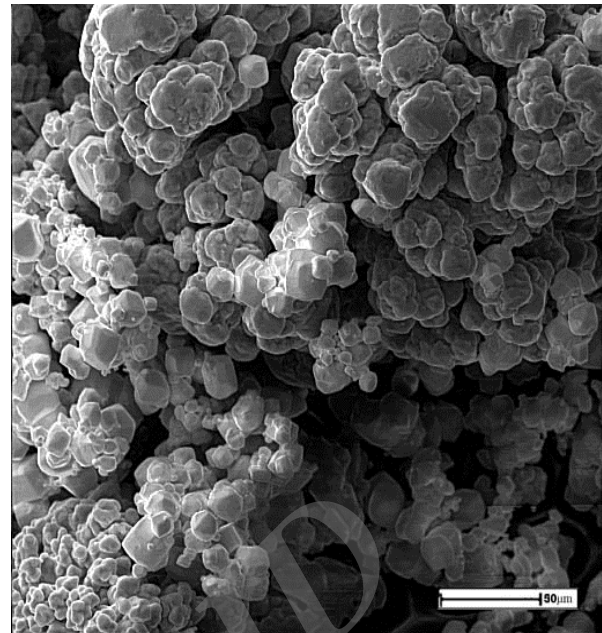
یافته که دلیل این امر می‌تواند کاهش گرانروی (ویسکوزیته) مایع با افزایش دما باشد [۷]. در دمای  $1150^{\circ}\text{C}$  به دلیل سیالیت کم مذاب، مذاب نمی‌تواند با کمک نیروی موئینگی خود را به حفره‌های خالی برساند و در نتیجه چگالی تنها ۴/۱ درصد افزایش یافته است (درصد انقباض نمونه) و چگالی به دست آمده کمتر از دیگر دماها می‌باشد.

در دمای  $1400^{\circ}\text{C}$ ، با وجود این که سیالیت مس بیشتر می‌شود اما چگالی آن نسبت به دو دمای دیگر کاهش یافته است. بر طبق سازوکار سینتر در حضور فاز مایع، دلیل احتمالی کاهش چگالی با افزایش دما را می‌توان به این صورت توضیح داد که قبل از خروج مس از حفره‌های به هم پیوسته به علت جریان گرانروی و نیروی موئینگی، وقتی دمای سینتر به مقدار معینی می‌رسد، سینتر فاز جامد ذرات تنگستن رخ می‌دهد و در این زمان مقدار مشخصی از حفره‌های بسته شده تشکیل می‌شوند. این حفره‌های بسته با نفوذ حجمی و نفوذ سطحی در طی سینتر فاز جامد بعدی حذف نمی‌شوند، در نتیجه مقدار چگالش کاهش پیدا می‌کند [۸]. علاوه بر این، می‌توان علت کاهش چگالی را به علت هدررفت مس از نمونه بیان نمود که موجب کاهش وزن (همراه با کاهش ابعاد نمونه) می‌گردد [۹] و این حالت در نمونه نیز مشاهده شد (کاهش وزن نمونه  $0.43\text{ gr}$  به همراه کاهش ابعاد کمتر از دیگر نمونه‌ها).

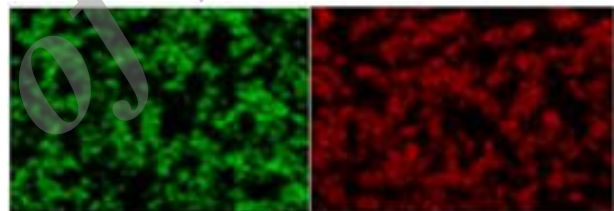
جدول ۲. نتایج چگالی حاصل از بررسی تأثیر دماهای مختلف سینتر در حضور فاز مایع ماده مرکب تنگستن - ۳۰ درصد مس.

دمای سینتر در حضور فاز مایع (C)	۱۱۵۰	۱۲۰۰	۱۳۰۰	۱۴۰۰
چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )	۱۱/۹۰	۱۲/۶۲	۱۲/۶۶	۱۲/۲۲

ریزساختار این نمونه‌ها در شکل (۶) (با دو بزرگنمایی ۲۰۰ و ۱۰۰۰ برابر با میکروسکوپ نوری) آورده شده‌اند.



شکل ۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از پودرهای تنگستن - ۳۰ درصد مس مخلوط شده به مدت یک ساعت.

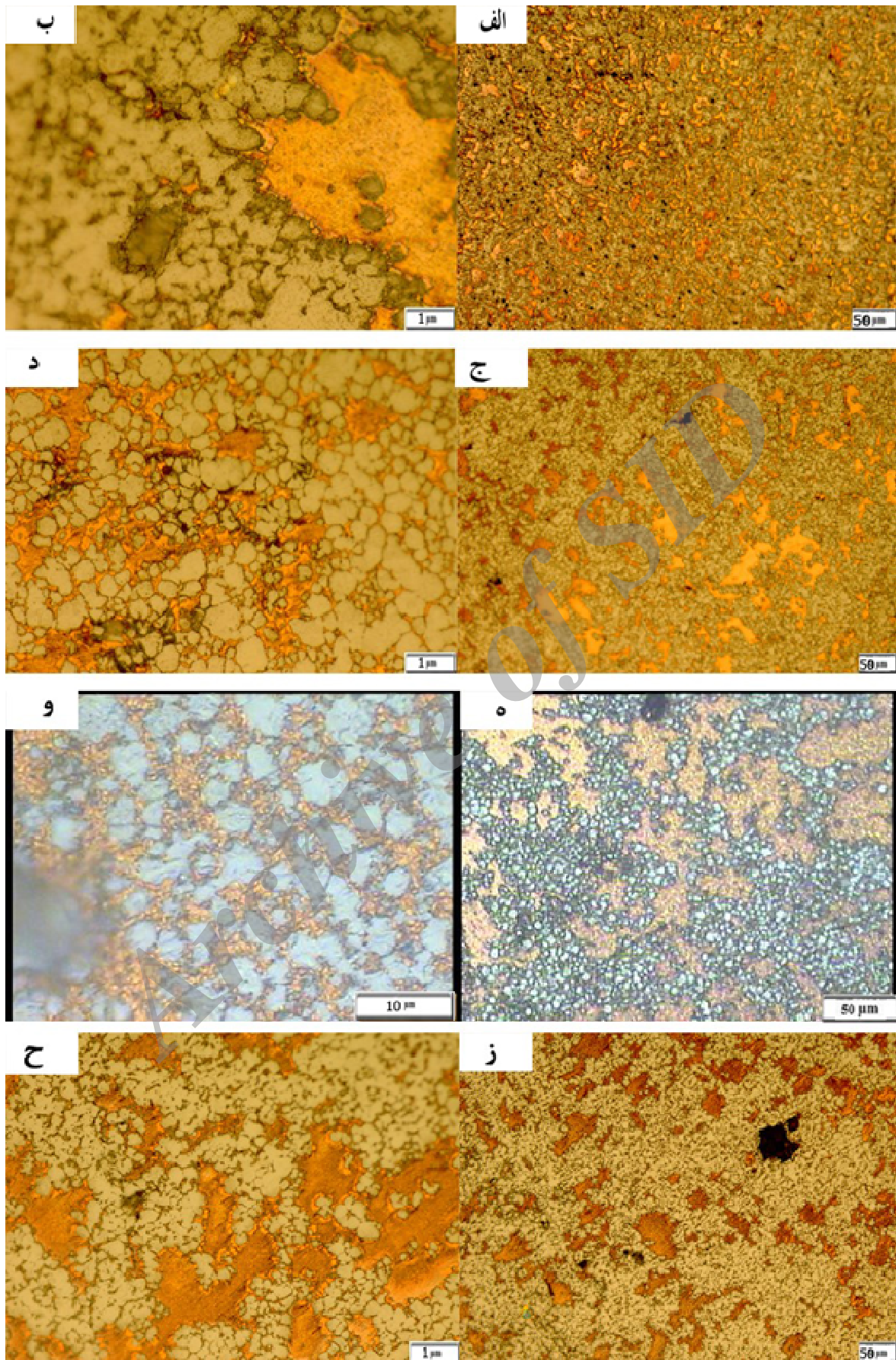


شکل ۵. نقشه‌های پرتوایکس عنصری پودر مخلوط شده به مدت یک ساعت، رنگ قرمز: پراکندگی مس و رنگ سبز: پراکندگی تنگستن.

چگالی پودر مخلوط، پیش از فشردن برابر  $5/1\text{ g/cm}^3$  به دست آمد. برای به دست آوردن چگالی نسبی، نیاز به چگالی نظری است که برای  $125\text{ gr}$  پودر مخلوط تنگستن - ۳۰ درصد مس، چگالی نسبی پودر مخلوط پیش از فشردن برابر  $35/71$  درصد به دست می‌آید. چگالی نمونه پس از پرس ایزواستاتیک سرد، مقدار  $11/43\text{ g/cm}^3$  به دست آمد که چگالی نسبی آن معادل  $80/04$  درصد است.

نتایج بررسی چگالی نمونه‌های سینتر شده در حضور فاز مایع در دماهای  $1150-1200-1300-1400$  درجه سانتی‌گراد در جدول (۲) آورده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما تا  $1300^{\circ}\text{C}$  چگالی نمونه‌ها، افزایش





شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه‌های سینتر شده در حضور فاز مایع در دماهای الف، ب (۱۱۵۰ ج، د، ۱۲۰۰، ه، و، ۱۳۰۰، ز، ح) ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با بزرگنمایی الف، ج، د، ز (بزرگنمایی ۲۰۰ برابر، ب، د، و، ح) بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر (تحت ثابت ماندن دیگر عوامل).

جدول ۳. نتایج سختی حاصل از بررسی تأثیر دماهای مختلف بر سینتر در حضور فاز مایع ماده مرکب تنگستن - ۳۰ درصد مس.

دمای سینتر در حضور فاز مایع (C)	۱۱۵۰	۱۲۰۰	۱۳۰۰	۱۴۰۰
سختی (برینل)	۱۰۵	۱۱۰	۱۲۴/۶	۱۰۷/۴

نتایج مربوط به آزمون کشش این نمونه‌ها در جدول (۴) و نمودارهای مربوط به کشش آنها در شکل (۷) (به جز نمونه سینتر شده در  $1150^{\circ}\text{C}$ ) آورده شده‌اند. نمونه سینتر شده فوق به علت چگالی بسیار پایین خود در کمتر از حد الاستیک و در قسمت بالای طول اصلی نمونه شکسته است. همان‌طور که از جدول (۴) و شکل (۷) استنباط می‌شود، استحکام نهایی، استحکام تسلیم و کرنش با افزایش دما تا  $1300^{\circ}\text{C}$  افزایش یافته و پس از آن کاهش دارد که می‌توان به حفره‌ها و در نتیجه چگالی نمونه‌ها مربوط دانست [۱۲]. مدول الاستیک نیز تقریباً ثابت است.

جدول ۴. نتایج تنش نهایی و کرنش حاصل از بررسی تأثیر دماهای مختلف بر سینتر در حضور فاز مایع ماده مرکب تنگستن - ۳۰ درصد مس.

دمای سینتر در حضور فاز مایع (C)	۱۱۵۰	۱۲۰۰	۱۳۰۰	۱۴۰۰
استحکام نهایی (MPa)	۱۹	۲۴۷	۲۷۲	۲۴۸
استحکام تسلیم (MPa)	-	۱۵۰	۱۶۶	۱۸۸
کرنش	۰/۰۱	۰/۰۵۷	۰/۰۵	۰/۰۶۰
مدول الاستیک (GPa)	-	۲/۶۳	۳/۳۲	۳/۱۳

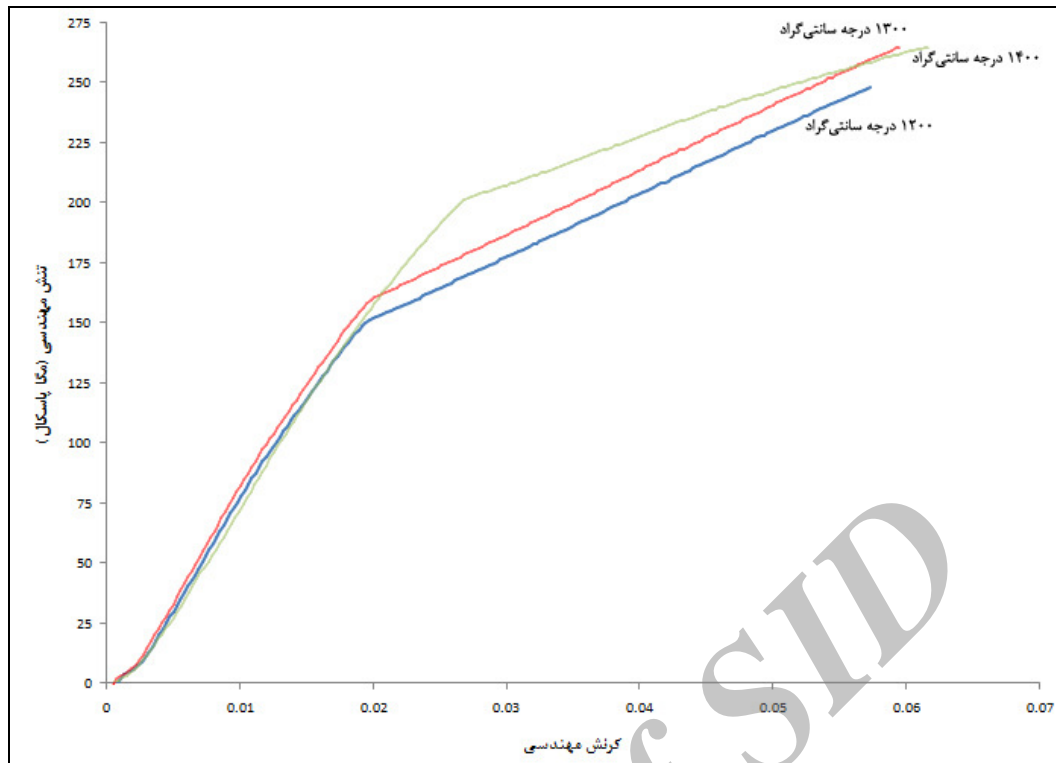
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از پودرهای در حد میکرومتر از تنگستن و مس و روش مخلوط کردن- فشردن- سینتر در حضور فاز مایع با دماهای متفاوت ماده مرکب تنگستن- مس با ۳۰ درصد وزنی مس تولید شد. مشاهده شد که دمای بهینه برای سینتر در حضور فاز مایع ترکیب مذکور،  $1300^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد است که در آن دما خواص رفتار بهتری نسبت به دیگر دماها از خود نشان می‌دهد. همچنین مشخص شد که در دمای  $1150^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به علت بسته شدن حفره‌های بین ذرات تنگستن، مس توانایی رساندن خود به حفره‌ها را ندارد که در نتیجه محصول تولیدی، چگالی پایینی را ایجاد می‌کند.

همان‌طور که در شکل ۶- الف، ب دیده می‌شود در نمونه  $1150^{\circ}\text{C}$  مقدار حفره‌های موجود، بیشتر از سایر نمونه‌ها است. همچنین این حفره‌ها بزرگ‌تر نیز هستند که علت آن می‌تواند به علت سیالیت پایین مذاب مس در این دما باشد. علاوه بر این، توزیع یکنواخت مس (شبکه پیوسته مس در مرزدانه‌های تنگستن) در این نمونه دیده نمی‌شود. در نمونه سینتر شده در  $1200^{\circ}\text{C}$  (شکل ۶- ج، د) نسبت به نمونه قبل حفره‌های کمتری دیده می‌شود و به نظر می‌رسد که این حفره‌ها کوچک‌تر نیز شده‌اند. در نمونه مشاهده می‌شود که شبکه‌ای از مس در اطراف دانه‌های تنگستن تشکیل شده و حفره‌ها بین شبکه مسی و دانه‌های تنگستن (شکل ۶- د) قرار گرفته‌اند. همچنین دانه‌های تنگستن نیز شکل یکنواختی دارند. در نمونه سینتر شده در  $1300^{\circ}\text{C}$  (شکل ۶- ه، و) نیز می‌توان نتایج بالا را گرفت، گرچه در این نمونه شبکه مسی به صورت مناسب‌تری وجود دارد. در نمونه سینتر شده در  $1400^{\circ}\text{C}$  (شکل ۶- ز، ح) با توجه به اینکه ساختار نسبتاً یکنواختی از مس و تنگستن وجود دارد و حفره‌ها در مرزدانه‌های مس و تنگستن قرار گرفته‌اند، اما به نظر می‌رسد حفره‌ها بزرگ‌تر شده‌اند.

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، کاهش چگالی با افزایش دما پس از  $1300^{\circ}\text{C}$  می‌تواند به علت حفره‌های تهی از مس (شکل ۶- ح، ز) باشد. با افزایش دما، سیالیت مس افزایش می‌یابد و افزایش سیالیت، موجب می‌شود که جریان حرارتی موضعی در حجم ماده مرکب یکنواخت نباشد، در نتیجه ناهمگنی نیروهای هیدرواستاتیکی در ماده ایجاد شود. در حین حرکت مذابی که ذرات تنگستن را احاطه کرده است، ناهمگنی موجب چرخش و حرکت این ذرات می‌شود و در اثر آن گوشه‌های تیز ذرات تنگستن به وسیله سایش از بین رفته و به این ترتیب حفره‌های کوچک بیشتری بین ذرات تنگستن ایجاد می‌شوند [۱۰].

نتایج سختی‌سنجی این نمونه‌ها (برحسب برینل و میانگین سه نقطه) در جدول (۳) آورده شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش دما، سختی همانند چگالی افزایش یافته که علت آن می‌تواند چگال‌تر شدن ریزساختار در دمای بالاتر (نسبت به دیگر دماها) باشد و کاهش سختی با افزایش دما نیز به حفره‌های تهی از مس مرتبط می‌شوند [۱۰ و ۱۱].



شکل ۷. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های سینتر شده در حضور فاز مایع در دماهای ۱۲۰۰-۱۳۰۰-۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت در اتمسفر هیدروژن.

## مراجع

- Zhigang Li, Chengchang Jia, Yuntao He, Liliang Chen, "Kinetic characteristics of liquid phase sintering of mechanically activated W-15%Cu powder", *Journal of university of science and technology Beijing*, 2006,13, 4, 338-45.
- Xiaoliang, SHI. , Shuwei, Vyang. , Zhang Qiaoxin, Xingyong. , Yufu, Wang. , "Effects of Activated Sintering Process on Properties and Microstructure of W-15Cu Alloy", *Journal of Wuhan University of Technology-Material Science*, 2010, 25 , 909-913.
- Ardestani, M. , Rezaie , H. R. , Arabi, H. , Razavizadeh, H. , "The effect of sintering temperature on densification of nanoscale dispersed W-20-40%wt Cu composite powders", *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2009, 27, 862-867.
- Ghaderi Hamidi, A. , Arabi, H. , Rastegari, S. , "A feasibility study of W-Cu composites production by high pressure compression of tungsten powder ", *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2011, 29, 123-127.
- Ibrahim, A. , Abdallah, M. , Mostafa, S. F. , Abousree Hegazy, A. , "An experimental investigation on the W-Cu composites", *Materials and design*, 2009, 30, 1398-1403.
- Abu-Oqail, A. , Ghanim, M. , El-Sheikh, M. , El-Nikhaily, A. , "Effects of processing parameters of tungsten-copper composites", *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, 35, 207-212.
- Roosta, Mostafa, Baharvandi, Hamidreza, Abdizade, Hossein , "An experimental investigation on the fabrication of W-Cu composite through hot-press ", *International Journal of Industrial Chemistry*, 2012,112.
- التفات احمدی، مهدیه ملک زاده، سید خطیب الاسلام صدرنژاد، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، ۱۳۹۰، جلد ۵، ۲۷-۳۴.
- Maneshian, M. H., Simchi, A., Razavi Hesabi, Z. , "structural changes during synthesing of nanostructured W-20%Cu composite powder by mechanical alloying", *Material science and engineering A*, 2007, 86-93.
- Kumar Sahoo, Prasanta , Kalyan Kamal, Sarika Srinivas, Premkumar, M. , Bojja Sreedhar, M. , Srivastava, Suneel Kumar, Durai, Loganathan "Synthesis, characterization and densification of W/Cu nanocomposite powders", *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2011, 29, 547-554.
- Kang, L. , Joong, Suk, "Sintering Densification, Grain Growth, and Microstructure", *Elsevier*, Burlington, 2005.
- Taghavi Pourian Azar, G., Rezaie, H. R. , Razavizadeh, H. , "Synthesis and consolidation of W-Cu composite powders with silver addition", *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, 31, 157-163.