

## بررسی پارامترهای فرایند تولید دوفلزی آلیاژ (تنگستن - مس - نیکل) / مس خالص از روش تفجوشی پلاسما

شاهین معصومی گنجگاه و مهرداد عباسی\*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، استان البرز، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۸/۱۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱)

**چکیده-** در این پژوهش هدف بررسی عوامل مؤثر در ساخت دوفلزی مس / آلیاژ تنگستن - مس - نیکل از روش تفجوشی با قوس پلاسما (SPS) و بررسی ریزساختار و استحکام در فصل مشترک این دوفلزی است. پارامترهای دمای تفجوشی و درصد مس در آلیاژ تنگستن - مس - نیکل در این پژوهش تغییر داده شده‌اند. ابتدا از تفجوشی پودر آلیاژ تنگستن - مس (۱۲ و ۱۴ درصد وزنی) - نیکل (۳ درصد وزنی) نمونه‌های پولکی شکل در دمای ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد از روش تفجوشی با قوس پلاسما ساخته شد، سپس این نمونه‌ها از روش تفجوشی با قوس پلاسما در دماهای مختلف به یک نمونه حجمی مس، جوش متالورژیکی داده شد و ریز ساختار و استحکام باند در فصل مشترک به ترتیب با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و آزمون استحکام برشی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که از این طریق می‌توان یک پیوند فلزی یک پارچه با مرز مونولیتیک و با استحکام برشی بالا، حدود ۴۵ مگاپاسکال، بین آلیاژ تنگستن (W-12Cu-3Ni) با مس خالص ایجاد کرد، که در پژوهش‌های قبلی چنین جوش با کیفیت بالایی گزارش نشده است.

واژه‌های کلیدی: دوفلزی - تنگستن - مس - نیکل - تفجوشی با قوس پلاسما.

## Production of W-Cu-Ni Alloy and Cu Bimetal by SPS Process and Analysis of Process Parameters

S. Masoomi Ganjgah and M. Abbasi\*

Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Karaj Branch, Alborz, Iran.

**Abstract:** This study aims at investigating changes in microstructure and strength of W alloy and Cu bimetals with varying spark plasma sintering (SPS) temperature and percentage of copper in W-Cu-Ni alloy. After SPS of W (12 wt%)-Cu (14 wt%)-Ni (3 wt%) alloy powder into consolidated discs at 1350 °C, they were spark plasma sintered to copper discs at various temperatures. Assessment of the interface microstructure and shear strength was performed by field emission scanning electron microscope (FESEM) and shear strength test, respectively. Results indicated SPS is successful in forming a perfect metallic bond with monolithic interface and high shear strength of about 45 MPa in Cu/W-12Cu-3Ni bimetal that is extra high quality and not reported in previous investigations.

**Keywords:** Bimetal, Tungsten, Copper, Nickel, Spark Plasma Sintering.

\* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mabbasi@kiauo.ac.ir

## ۱- مقدمه

امکان اتصال فلزات غیرمشابه با روش‌هایی جوشکاری معمولی بسیار دشوار و یا غیرممکن است همچنین در بسیاری از مواقع پس از اتصال نیز خواص مکانیکی این قطعات در محل اتصال و نزدیکی آن کیفیت و استحکام پایینی دارند و این موضوع قطعات تولیدی را بسیار ناکارآمد می‌کند [۱] دوفلزی<sup>۱</sup>ها یا دوفلزی‌های تنگستن-مس، با توجه به ترکیب منحصر به فرد، دارای خواص کاربردی ویژه‌ای هستند. مقاومت به سایش و نقطه ذوب بالای تنگستن و شکل‌پذیری راحت و رسانایی حرارتی و الکتریکی زیاد مس باعث می‌شود این دوفلزی، در صنایعی همچون صنایع برق، خودروسازی، هوافضا و ... کاربرد داشته باشد. دوفلزی ماده‌ای است که از دو فلز یا آلیاژ که ماهیت کاملاً متفاوتی دارند، تشکیل می‌شود. در فصل مشترک دوفلز پیوند فلزی با استحکام و پیوستگی بالا وجود دارد. به طوری که هر فلز و یا آلیاژ خواص منحصر به فرد خود را در دوفلزی ارائه می‌دهند که ترکیب این خواص موجب می‌شود قطعه دوفلزی دارای خواص ترکیبی و گاه متضاد باشد. دوفلزی تنگستن-مس بیشتر در قطعات الکتریکی به عنوان کلید قطع و وصل برق فشار قوی کاربرد دارد، قسمت مس هدایت خوب الکتریکی را تأمین می‌کند و قسمت تنگستن، تأمین کننده مقاومت لازم در مقابل قوسی است که در هنگام قطع و وصل جریان توسط کلید ایجاد می‌شود. به منظور ایجاد جوش و اتصال میان فلزات روش‌های مختلفی وجود دارد. اما به دلیل اینکه تنگستن و مس نقطه انحلالی در یکدیگر ندارند، اتصال و جوشکاری این دو فلز به یکدیگر بسیار مشکل است و نیاز به روش‌های ویژه است. یکی از روش‌ها برای اتصال تنگستن-مس، روش تف‌جوشی با قوس پلاسما (SPS)<sup>۲</sup> است. روش تف‌جوشی با قوس پلاسما یک روش متالورژی پودر است که با فشردن پودر مواد به شکل مورد نظر و تف‌جوشی آن در درجه حرارتی زیر نقطه ذوب و یا ذوب سطحی و موضعی در سطح ذرات، قطعات فلزی و سرامیکی تولید می‌شوند [۲]. تف‌جوشی با قوس پلاسما از طریق آزادسازی انرژی

الکتریکی با استفاده از ایجاد میکرو قوس در نواحی متخلخل بین ذرات، عمل تف‌جوشی بین اجزا را انجام می‌دهد که موجب تولید قطعاتی با گرانیوی بالا و بدون تخلخل می‌شود. از مزایا و ویژگی‌های این فرایند نسبت به روش‌های تف‌جوشی معمولی می‌توان به زمان تف‌جوشی بسیار کوتاه و تولید قطعات با ساختارهای متراکم دانه ریز اشاره کرد [۳]. روش تف‌جوشی با قوس پلاسما یک تکنولوژی تف‌جوشی است که قابلیت اتصال ذرات را در مواد رسانا و غیررسانا دارا است. تئوری‌های مختلفی برای فرایند تف‌جوشی با قوس پلاسما پیشنهاد شده است اما متداول‌ترین تئوری پذیرفته شده، تئوری میکرواسپارک پلاسما است. این تئوری بر پایه تخلیه الکتریکی و تولید جرقه بین ذرات پودر استوار است که در آن پالس‌های جریان با آمپر بالا و ولتاژ پایین، به طور آنی (لحظه‌ای) جرقه پلاسما با دمای زیاد را در یک ناحیه موضعی کوچک بین ذرات ایجاد می‌کند [۴]. فاکتورهای اصلی برای پیشرفت عملیات تف‌جوشی، حرارت تولید شده توسط منبع نیرو و سیلان پلاستیک مواد است [۵]. یکی از مهم‌ترین تأثیرات پالس‌های جریان برق مستقیم (DC)<sup>۳</sup> در فرایند تف‌جوشی با قوس پلاسما، فعال‌سازی سطح ذرات پودر است. به این ترتیب که تخلیه الکتریکی ایجاد شده در فاصله بین ذرات پودر باعث شکسته شدن لایه‌های اکسید سطحی شده و با شکسته شدن این فیلم‌های سطحی، قوس الکتریکی (جرقه) ایجاد می‌شود. که علاوه بر این پدیده تخلیه الکتریکی می‌تواند باعث یونیزه شدن گاز موجود در فواصل بین ذرات پودر شده و بنابراین منجر به تولید پلاسما شود. مجموع عوامل فوق، فعال‌سازی فیزیکی سطح ذرات پودر را موجب می‌شود [۶]. در پژوهشی توسط یوسفی و همکاران، آلیاژی از تنگستن-مس به صورت سه لایه، از لایه‌های تنگستن خالص، آلیاژ W50Cu50 و مس خالص و همچنین کامپوزیتی دو لایه از لایه‌های آلیاژی W50Cu50 و W25Cu75 با استفاده از روش تف‌جوشی تحت خلأ تولید شد و نتایج نشان داد که نمونه آلیاژی سه لایه دارای سختی و چگالی نسبی بیشتری از نمونه کامپوزیتی دو لایه است [۷]. لانگو و همکاران

در مقاله ارائه شده در سمینار بین‌المللی آموزش علوم  $TOP^*$ ، توانایی روش تفجوشی با قوس پلاسما برای تولید انواع مختلف آلیاژهای  $W-Cu-Ni$  در زمان کوتاه را گزارش می‌دهند. علاوه بر این ثابت شد که آلیاژ  $W-Ni-Cu$ ، ۲۴ درصد وزنی مس و یک درصد وزنی نیکل دارد که به روش تفجوشی با قوس پلاسما تولید شده است. دارای خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی مطلوبی بوده و قطعه تولید شده در مقابل ضربات قوس الکتریکی مقاوم بوده که برای استفاده در کلیدهای برق ولتاژ بالا بسیار کاربرد دارد [۸]. تانگ و همکاران نمونه‌های تنگستن-مس را در مدل مواد هدفمند منطبق بر کاربرد  $FGM^5$  از لایه‌های مختلف تنگستن-مس با محتوای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد حجمی مس ایجاد کردند و با استفاده از روش تفجوشی با قوس پلاسما در دماهای مختلف تفجوشی کردند، واضح است که تراکم نسبی با افزایش درجه حرارت تفجوشی افزایش می‌یابد. این مورد بدین صورت توجیه می‌شود که با افزایش دمای تفجوشی مس موجود به صورت مایع در بین شبکه تنگستن قرار می‌گیرد و با افزایش دما این عمل سریع‌تر و بیشتر اتفاق می‌افتد به طوری که مقدار چگالی نسبی به  $96/53$  درصد در دمای  $1050$  درجه سانتی‌گراد رسید. همچنین گزارش شده است که، ویژگی‌های تفجوشی موجود در روش تفجوشی با قوس پلاسما نسبت به سایر روش‌های تفجوشی، می‌تواند باعث کاهش دمای پخت به میزان  $100$  تا  $200$  درجه سانتی‌گراد شود. این بدین معنی است که ممکن است دمای سیتترینگ  $1050$  درجه سانتی‌گراد در روش تفجوشی با قوس پلاسما، معادل با  $1150$  و  $1250$  درجه سانتی‌گراد در روش‌های دیگر باشد [۹]. آتیسیر و همکاران در پژوهشی به بررسی پارامترهای روش تفجوشی پلاسما در ساخت یک نمونه چند لایه  $FGM$  پرداختند. در این پژوهش یک لایه بلوک مانند تنگستن به یک لایه بلوک از آلیاژ  $CuCrZr$  توسط لایه‌های میانی از غلظت‌های مختلف پودر  $W-Cu$ ، جوش داده شده است. ترکیب لایه‌های میانی به ترتیب، لایه اول که در تماس با بلوک تنگستن است به منظور کاهش

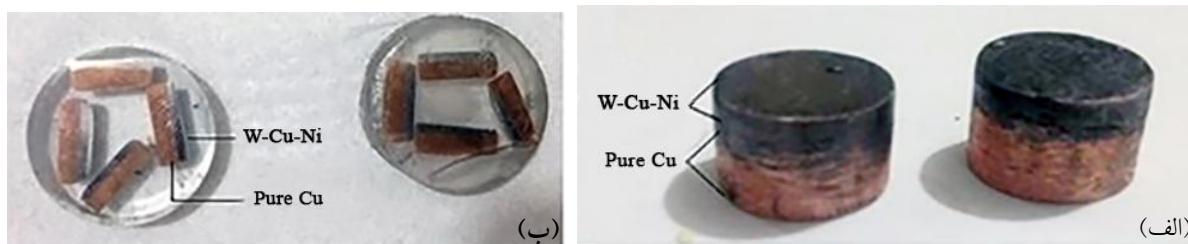
شکست در بلوک، دارای ترکیب  $W80Cu20$  بوده که غنی از تنگستن است، لایه دوم دارای ترکیب  $W60Cu40$  بوده و اجازه انتقال عناصر بین لایه‌ها را می‌دهد و لایه سوم که در تماس با بلوک آلیاژی  $CuCrZr$  است دارای ترکیب  $W40Cu60$  که غنی از مس است بوده است. ارزیابی طیف‌سنجی پرتو ایکس بر پایه پرتو ایکس برگشتی  $EDX^6$  نشان داد که در این روش فلز مایع (مس) به داخل ساختار متخلخل تنگستن نفوذ کرده و در این حالت مذاب در سرتاسر قطعه متراکم منتشر می‌شود و باعث از بین رفتن تخلخل‌ها می‌شود [۱۰]. در تحقیقی دیگر نتایج نشان داد که پر کردن منافذ قطعات متخلخل با یک ماده با دمای ذوب پایین‌تر، روشی برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی آنها به شمار می‌رود. و در روش تفجوشی پلاسما، فشار و دمای آنی بالا باعث سیالیت ماده دارای نقطه ذوب پایین‌تر، در زیر نقطه ذوب آن می‌شود و نیروی موئینگی باعث می‌شود که مذاب سیال این ماده به درون ساختار متخلخل ماده دارای نقطه ذوب بالاتر جریان پیدا کند و باعث بهبود چقرمگی و استحکام مکانیکی نمونه شود [۱۱]. یک ماده نفوذ کننده ایده‌آل، منافذ قطعه را کاملاً پر کرده و از سیالیت خوبی برخوردار است برای پر کردن منافذ تنگستن و به منظور دستیابی به ویژگی‌های مورد نظر از مس، نیکل، آهن و پالادیوم استفاده می‌شود. همچنین گرمایش طولانی ممکن است باعث ورم کردن قطعه در اثر واکنش‌های متالورژیکی شود به همین جهت زمان‌های نفوذ و رخنه دادن معمولاً کوتاه انتخاب می‌شود. چقرمگی بیش از سایر ویژگی‌های مکانیکی در اثر پر شدن منافذ بهبود می‌یابد به عنوان مثال باید گفت انرژی ضربه‌ای در مورد آهنی که با مس مورد نفوذ و رخنه قرار داده شده است چندین برابر افزایش می‌یابد [۱۲]. در تحقیق دیگری که لانگو و همکاران انجام دادند، از مخلوط  $85$  درصد وزنی تنگستن،  $12$  تا  $14$  درصد وزنی مس و یک تا سه درصد وزنی نیکل که به صورت پودر بوده، برای ساخت آلیاژهای تنگستن-مس-نیکل از روش تفجوشی پلاسما استفاده شده بود و در دمای  $1100$  درجه سانتی‌گراد چگالی نسبی نمونه  $91/25 - 93/73$  درصد بوده است و با

افزایش درجه حرارت به ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد (از آنجایی که تحرک Cu و Ni در آلیاژ تنگستن افزایش یافت و نمونه‌ها بیشتر متراکم شدند) چگالی نسبی بین ۹۷/۹۷-۹۶/۰۱ شد. این تحقیق نشان داد آلیاژی که بالاترین مقدار مس را دارد و در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تف‌جوشی شده است، دارای کمترین میزان میکروسختی و پایین‌ترین چگالی است. این موضوع به علت ماهیت سختی پایین Cu رخ می‌دهد. در نتیجه برای نمونه‌های پخت شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ریزساختار چگال‌تر و با تخلخل کم به دست آمده بود [۱۳]. در پژوهشی زوو و همکاران نشان دادند که انتخاب نوع آلیاژ تنگستن - مس وابسته به کاربرد و خواص مورد نظر آن است، از آلیاژهایی که درصد مس از تنگستن بیشتر است در مواردی که خاصیت رسانایی حرارتی و الکتریکی بالا و شکل‌پذیری خوب مدنظر باشد استفاده می‌شود، همچنین از آلیاژی با درصد تنگستن بیشتر، هرگاه مقاومت به دمای بالا، مقاومت به قوس الکتریکی، مقاومت به سایش و سختی بالا مدنظر باشد استفاده می‌شود [۱۴]. تفاوت اصلی این پژوهش با مقالات قبلی در اتصال مستقیم نمونه حجمی مس خالص به آلیاژ تنگستن - مس است. در تمامی مقالات فوق بیشتر از روش تف‌جوشی پلاسما برای ساخت آلیاژهای تنگستن - مس استفاده شده است اما هدف اصلی این پژوهش ساخت دوفلزی، آلیاژ تنگستن - مس / مس خالص، از روش تف‌جوشی پلاسما و همچنین بررسی و مقایسه نمونه‌ها از لحاظ ریزساختار فصل مشترک دوفلزی، استحکام برشی جوش ایجاد شده، بررسی و تحلیل عناصر در فصل مشترک با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۷</sup> بوده است. نمونه به دست آمده در این پژوهش در صنایع زیادی به خصوص صنایع برق و در ساخت کلیدهای کنتاکتورهای برق فشار قوی کاربرد دارد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از پودر تنگستن با خلوص بیش از ۹۹/۸ درصد با اندازه ذرات ۱۰ میکرومتر، پودر مس با خلوص بیش از ۹۹ درصد با اندازه ذرات حدود ۱۰ میکرومتر، پودر نیکل با خلوص

۹۹ با اندازه ذرات حدود ۱۰ میکرومتر استفاده شده است. همچنین در فرایند آسیاکاری از اسید استاریک با خلوص بیش از ۹۹ درصد به عنوان عاملی برای جلوگیری از بهم چسبیدن ذرات پودر و تشکیل کلوخه در داخل آسیا و همچنین جلوگیری از چسبیدن ذرات پودر به دیواره‌های آسیا استفاده شد. با توجه به مقالات گذشته و تأثیر عنصر نیکل بر بهبود روند سیتر، در این پژوهش از مواد اولیه تنگستن - مس - نیکل با دو ترکیب متفاوت (W-14Cu-3Ni) و (W-12Cu-3Ni) استفاده شده است. انتخاب این ترکیب و روش ساخت با مطالعه و بررسی مقالات پیشین به خصوص مقاله لانگو و همکاران [۸] صورت گرفته است در این پژوهش به منظور دستیابی به ترکیبی هموزن این دو ترکیب، در آسیای سیاره‌ای مخلوط شدند. دستگاه آسیاکاری استفاده شده در این پژوهش از نوع آسیاکاری گلوله‌ای سیاره‌ای است و ساخت شرکت Retsch آلمان است. در کلیه آزمایش‌ها سرعت چرخش ۱۵۰ دور بر دقیقه، نسبت گلوله به پودر ۱۰ به یک و مدت زمان آسیا، یک ساعت منظور شده است. پس از تهیه مخلوط‌های مناسب، مخلوط پودری تنگستن - مس - نیکل با استفاده از پرس تک‌محور ۱۰۰ مگاپاسکال و قالب فولادی با قطر داخلی ۱/۴ سانتی‌متر، پرس می‌شود. هدف از پرس کردن مخلوط پودری، تولید قرص اولیه، پیش شکل‌دهی و افزایش چگالی مخلوط اولیه است. قرص پودر اولیه در داخل قالب گرافیتی قرار داده می‌شود. تمام دیواره داخلی قالب برای جلوگیری از تماس پودر با قالب، با فویل گرافیتی پوشانده شده است. دمای نمونه توسط یک پیرومتر که در محل نزدیک به نمونه نصب می‌شود اندازه‌گیری می‌شود. جنس قالب‌های مذکور از جنس گرافیت با کد R4340 ساخت شرکت SGL آلمان است که توانایی تحمل فشار تا ۹۰ مگاپاسکال را دارد و هادی جریان الکتریکی است. در ادامه، بعد از قرارگیری قالب در محفظه خلأ، پمپ خلأ روشن شده و شروع به تخلیه هوای داخل محفظه می‌کند. در حین این مرحله فشار مورد نظر روی نمونه تنظیم می‌شود. در این پژوهش، حداکثر فشار مکانیکی که بر نمونه وارد خواهد شد، ۳۰ مگاپاسکال است که حداکثر قابل اعمال بوده است.



شکل ۱- نمونه‌های: الف) قبل از برش و ب) پس از برش، مانت و پولیش

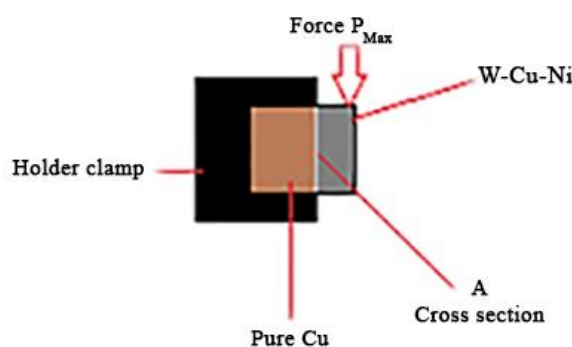
بعد از اینکه هوای داخل محفظه تخلیه شد و فشار داخل محفظه به ۱۵ پاسکال رسید، جریان الکتریکی شروع به عبور از داخل قالب می‌کند. سرعت گرمایش در این روش بسیار بالاتر از روش‌های مرسوم است که در اینجا از سرعت متوسط ۵۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه استفاده شد. همچنین انتظار می‌رود که گرمایش نمونه به صورت یکنواخت‌تر باشد، چرا که با توجه به عبور جریان از داخل نمونه (هرچند که میزان عبور جریان از داخل نمونه، کمتر از میزان عبور جریان از قالب است)، نمونه مذکور از داخل نیز شروع به گرم شدن می‌کند. با توجه به اینکه جریان الکتریکی از داخل قالب نیز عبور می‌کند، قالب نیز شروع به گرم شدن می‌کند و قالب گرافیتی نیز منجر به گرمایش نمونه از جهت خارج به داخل نمونه می‌شود؛ بنابراین نمونه هم از داخل و هم از جهت خارج، حرارت داده می‌شود. بیشینه دمای مورد نظر ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد است و مدت زمان ماندگاری در دمای بیشینه پنج دقیقه در نظر گرفته شد، که با حداکثر فشار (۳۰ مگاپاسکال) همراه است. بعد از پایان زمان ماندگاری و در حین سرد شدن نمونه ابتدا از شدت جریان الکتریکی کاسته می‌شود و سپس فشار مکانیکی موجود روی نمونه برداشته می‌شود. پس از اینکه دمای قالب و نمونه داخل آن به دمای محیط رسید، نمونه از قالب خارج می‌شود. نمونه‌های حاصل به صورت پولکی شکل بوده و دارای دو ترکیب متفاوت (W-14Cu-3Ni) و (W-12Cu-3Ni) هستند. در ادامه نمونه‌های تولید شده را دوباره در دماهای ۶۰۰، ۶۵۰، ۷۰۰ و ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد با نمونه حجمی مس خالص تحت فرایند تف‌جوشی قوس پلاسما قرار داده شد تا جوش متالورژیکی بین آلیاژ تنگستن و مس خالص ایجاد شود. سپس

برای انجام هرگونه تجزیه و یا آزمون بعدی، لازم است که ابتدا پوشش گرافیتی که بر سطوح نمونه‌ها چسبیده است، پولیش شود. بعد از انجام پولیش کاری و تمیز کردن سطوح نمونه‌ها از گرافیت، نمونه‌ها در داخل دستگاه آلتراسونیک قرار داده می‌شوند تا در نهایت سطح نمونه‌ها عاری از هرگونه پوشش گرافیتی باشد. در شکل (۱-الف)، تصویر نمونه‌های دوفلزی اولیه که استوانه‌ای شکل هستند و دارای ابعادی به ارتفاع هفت میلی‌متر و قطر ۱۵ میلی‌متر هستند دیده می‌شود. برای مطالعه ریزساختار فصل مشترک، نمونه‌ها از مقطع عمود به جوش توسط وایرکات بریده و مانت شدند و مورد بررسی میکروسکوپی قرار گرفتند در شکل (۱-ب)، این نمونه‌ها مشاهده می‌شوند. در مرحله بعد آزمون‌های استحکام برشی و سنجش سختی در فصل مشترک انجام شد. لازم به ذکر است که در تمامی نمونه‌ها پارامترهای فشار و زمان ماندگاری در دمای بیشینه، ثابت در نظر گرفته شده و مقادیر آنها به ترتیب ۳۰ مگاپاسکال و پنج دقیقه بوده است. برای سهولت در نامگذاری نمونه‌ها و ذکر دمای تف‌جوشی آنها، نمونه‌ها کدگذاری شدند. در جدول (۱) کدگذاری نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

برای اندازه‌گیری استحکام برشی نمونه‌های سبتر شده از دستگاه کشش با نام تجاری STM 250 که دقت بالایی دارد استفاده شده است. این دستگاه قابلیت اعمال بار تا حداکثر نیروی شکست نمونه‌ها را داشته و به‌طور همزمان نیز از طریق نرم‌افزار اقدام به ثبت داده‌های نیرو در برابر جابه‌جایی و رسم نمودار مربوط به آن را می‌کند. شکل (۲) نمادین قالب آزمون استحکام برشی و نمونه جایگذاری شده در قالب را نشان می‌دهد.

جدول ۱. کدگذاری نمونه‌های تف‌جوشی شده

کد نمونه	ترکیبات دوفلزی	دمای تف‌جوشی دوفلزی (درجه سانتی‌گراد)	درصد ترکیبات آلیاژ اولیه تنگستن - مس - نیکل (دمای تف‌جوشی ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد است)
۶۰۰-۱۴-۳	Cu / W-14Cu-3Ni	۶۰۰	W-14Cu-3Ni
۶۵۰-۱۴-۳	Cu / W-14Cu-3Ni	۶۵۰	W-14Cu-3Ni
۷۰۰-۱۴-۳	Cu / W-14Cu-3Ni	۷۰۰	W-14Cu-3Ni
۷۵۰-۱۴-۳	Cu / W-۱۴Cu-۳Ni	۷۵۰	W-14Cu-3Ni
۶۰۰-۱۲-۳	Cu / W-12Cu-3Ni	۶۰۰	W-12Cu-3Ni
۶۵۰-۱۲-۳	Cu / W-12Cu-3Ni	۶۵۰	W-12Cu-3Ni
۷۰۰-۱۲-۳	Cu / W-12Cu-3Ni	۷۰۰	W-12Cu-3Ni
۷۵۰-۱۲-۳	Cu / W-12Cu-3Ni	۷۵۰	W-12Cu-3Ni



شکل ۲. نمادین نحوه اعمال نیروی برشی برای اندازه‌گیری استحکام برشی نمونه‌ها

استحکام برشی پیوند طبق روابط زیر به دست می‌آید:

$$S = \frac{P_{max}}{A} \quad (1)$$

$$A = \pi r^2 \quad (2)$$

در این رابطه  $S$  استحکام برشی پیوند،  $P_{MAX}$  ماکزیمم نیرو در نمودار نیرو-جاب‌جایی،  $A$  مساحت فصل مشترک در ناحیه جوش (مساحت سطح مقطع مشترک بین مس خالص و آلیاژ  $W-Cu-Ni$  شعاع نمونه است).

برای سنجش سختی نمونه‌ها از دستگاه سختی‌سنجی میکرو ویکرز ساخت شرکت هیتاچی ژاپن استفاده شده و سختی در فصل مشترک اندازه‌گیری شد است. نیروی اندازه‌گیری سختی

۱۰۰ گرم و مدت زمان اعمال نیرو ۲۰ ثانیه بوده است و برای بالا بردن دقت در آزمون انجام شده، هر آزمون برای هر مقطع از نمونه سه بار تکرار و میانگین اعداد به دست آمده گزارش شد.

برای بررسی و تحلیل نمونه‌های نهایی پس از فرایند تف‌جوشی با قوس پلاسما از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی استفاده شد. با استفاده از این دستگاه بررسی‌های کمی و کیفی از روش طیف‌سنجی پرتو ایکس بر پایه پرتو ایکس با دقت بالا و به صورت نقطه‌ای انجام شده است. میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مورد استفاده در تحقیق حاضر ساخت شرکت فیلیپس هلند است.

## ۳- نتایج و بحث

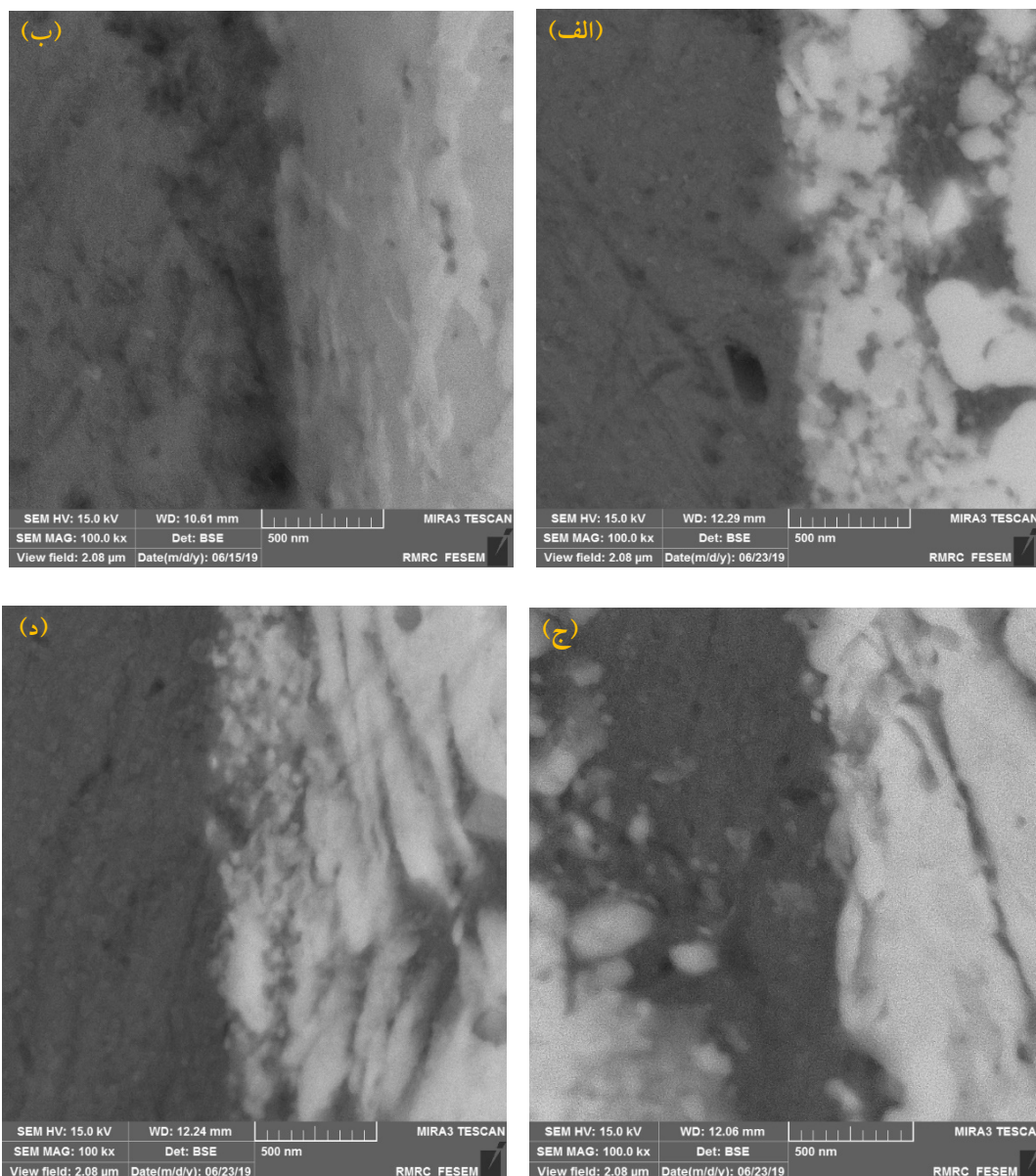
در شکل (۳) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی، از نمونه دوفلزی‌های مس خالص با آلیاژ W-14Cu-3Ni و W-12Cu-3Ni با بزرگنمایی صد هزار برابر در دماهای مختلف دیده می‌شود، در سمت راست آلیاژ تنگستن با رنگ سفید دیده می‌شود و می‌توان مشاهده کرد که مس دانه‌های تنگستن را در مرز در برگرفته است و در طول فرایند تف‌جوشی با قوس پلاسما، افزایش پیوستگی و چگالش با رخنه مذاب مس در تخلخل‌های ساختار تنگستن ایجاد شده است. در این شکل اتصال متالورژیکی در بزرگنمایی‌های بسیار بالا دیده می‌شود که نشان می‌دهد پیوندی مستقیم بین اتم‌های مس و تنگستن برقرار شده است و یک مرز بسیار نازک با نفوذ بسیار اندک مشاهده می‌شود. همچنین به‌نظر می‌رسد در اثر دما و فشار بالا اتم‌های مس و تنگستن در برد نیروهای بین اتمی یکدیگر قرار گرفته‌اند و در یک فاصله تعادلی، بین اتم‌های مس و تنگستن پیوند اتمی از نوع فلزی تشکیل شده است، به‌عبارتی مرز مونولیتیک<sup>۱</sup> (یکپارچه) در بین تنگستن و مس مشاهده می‌شود. این نوع اتصال در هیچ یک از مطالعات پیشین دیده نشده است و با توجه به این موضوع که تنگستن و مس هیچ نقطه انحلالی در یکدیگر ندارند، می‌توان گفت که این اولین بار است که بین این دو فلز یک اتصال مستقیم و یک پیوند اتمی از نوع فلزی مشاهده و گزارش می‌شود. در این نوع جوش تقریباً نفوذ اتمی بسیار اندک در مرز بین تنگستن و مس دیده می‌شود و ضخامت ناحیه نفوذ در حد چند دهم میکرون است ولی رخنه مس در تخلخل‌های تنگستن کاملاً قابل مشاهده است، در نتیجه یک جوش متالورژیکی بسیار خوب بین مس و تنگستن در مرز تشکیل شده است

در شکل (۴) همان‌طور که دیده می‌شود سختی در فصل مشترک دوفلزی، آلیاژ تنگستن - مس - نیکل با مس خالص، متوسط سختی آلیاژ تنگستن و مس خالص است. مس و نیکل در هم به‌طور کامل در حالت جامد حل می‌شوند و به‌همین

دلیل در فرایند تف‌جوشی با قوس پلاسما محلول جامد مس و نیکل به‌جای مس خالص تشکیل شده و در منافذ تنگستن رخنه می‌کند. بنابراین آلیاژ مس - نیکل به‌دلیل نفوذ در تخلخل‌ها و کاهش میزان تخلخل در ساختار آلیاژ تنگستن و ایجاد اتصال بدون تخلخل بین ذرات تنگستن، باعث افزایش سختی و استحکام در فصل مشترک می‌شود.

در شکل (۵- الف) مشاهده می‌شود که نسبت نیکل به مس ۳ به ۱۴ است و در شکل (۵- ب) مشاهده می‌شود که نسبت نیکل به مس ۳ به ۱۲ است و نتایج استحکام برشی نشان می‌دهد که استحکام برشی نمونه‌هایی که دارای نسبت نیکل به مس ۳ به ۱۲ هستند بیشتر از نمونه‌ها با نسبت نیکل به مس ۳ به ۱۴ است، در نتیجه هنگامی که به‌طور جزئی نسبت درصد نیکل به درصد مس افزایش یافته است، استحکام برشی جوش در فصل مشترک بهتر شده است و همچنین با مقایسه نتایج حاصل از آزمون مقاومت برشی مشخص شد که با افزایش دما از ۶۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، استحکام برشی جوش متالورژیکی ایجاد شده بین آلیاژ تنگستن - نیکل - مس با مس خالص بهبود می‌یابد. از دمای ۷۵۰ درجه به بالا مس تحت فشار دستگاه تف‌جوشی با قوس پلاسما خمیری شده و از قالب بیرون می‌زند و امکان افزایش دمای بیشتر وجود ندارد.

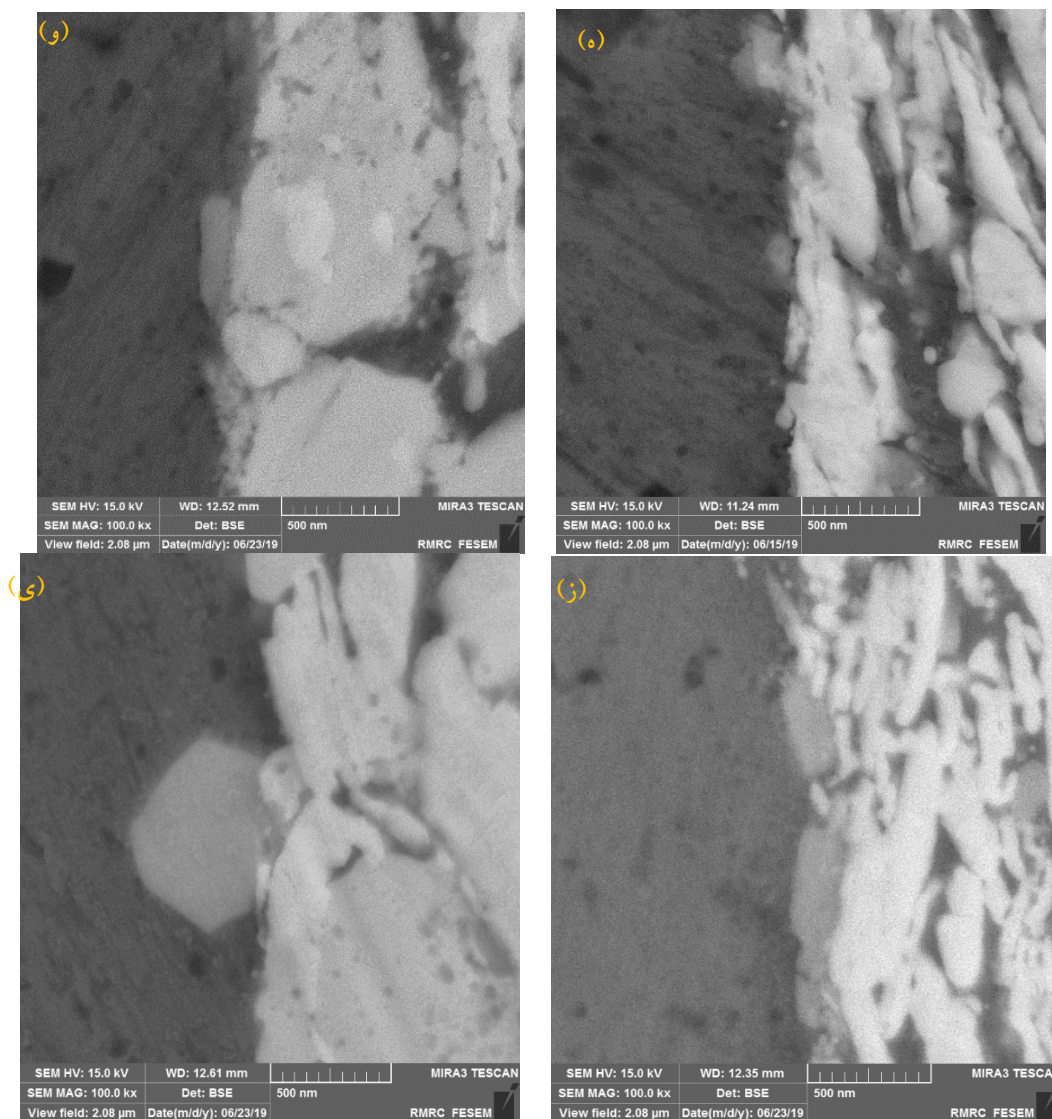
در شکل‌های (۶) تا (۹) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی و بررسی‌های نمودار توزیع خطی<sup>۱</sup> برای تعدادی از نمونه‌های دوفلزی دیده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فصل مشترک تمامی نمونه‌ها یک جوش پیوسته با مرز تک‌لایه و بدون عیب به‌وجود آمده است و نفوذ به‌صورت اتمی در دو طرف مرز در مقیاس بسیار کوچک و در حد چند دهم میکرون مشاهده می‌شود، به‌طوری که می‌توان گفت نفوذ دامنه‌داری صورت نگرفته است و محلول جامد مس و نیکل ذرات کوچک تنگستن را دربر گرفته‌اند. نتیجه این تحلیل نیز برقرار شدن یک جوش متالورژیکی خوب با مرز مونولیتیک در فصل مشترک دوفلزی است.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی در دماهای مختلف با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰۰ برابر:

- (الف) W-14Cu-3Ni / مس خالص تفجوشی شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد،  
 (ب) W-14Cu-3Ni / مس خالص تفجوشی شده در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد،  
 (ج) W-14Cu-3Ni / مس خالص تفجوشی شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد،  
 (د) W-14Cu-3Ni / مس خالص تفجوشی شده در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد،  
 (ه) W-12Cu-3Ni / مس خالص تفجوشی شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد،  
 (و) W-12Cu-3Ni / مس خالص تفجوشی شده در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد،  
 (ز) W-12Cu-3Ni / مس خالص تفجوشی شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد و  
 (ی) W-12Cu-3Ni / مس خالص تفجوشی شده در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد

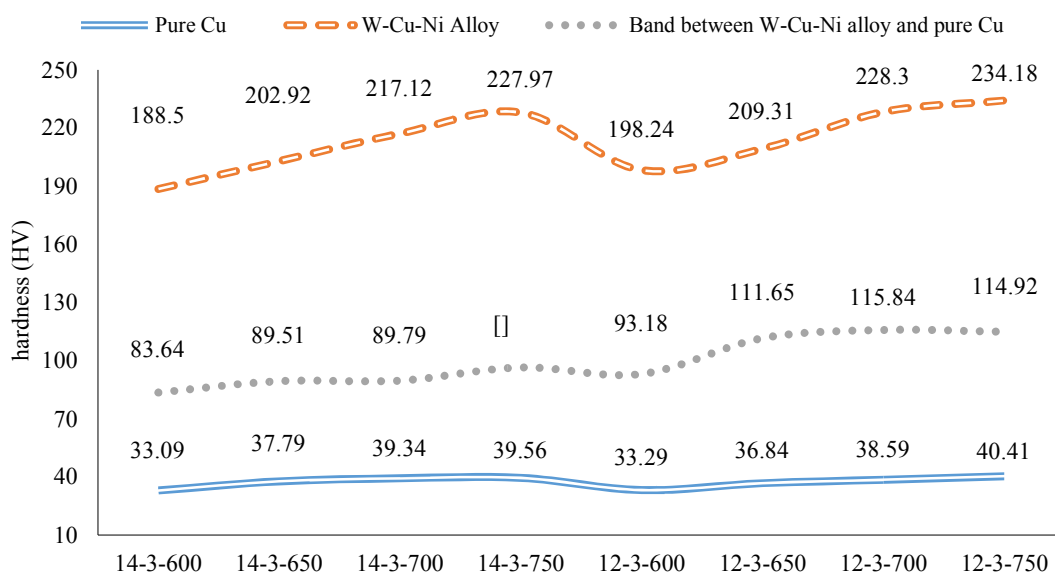




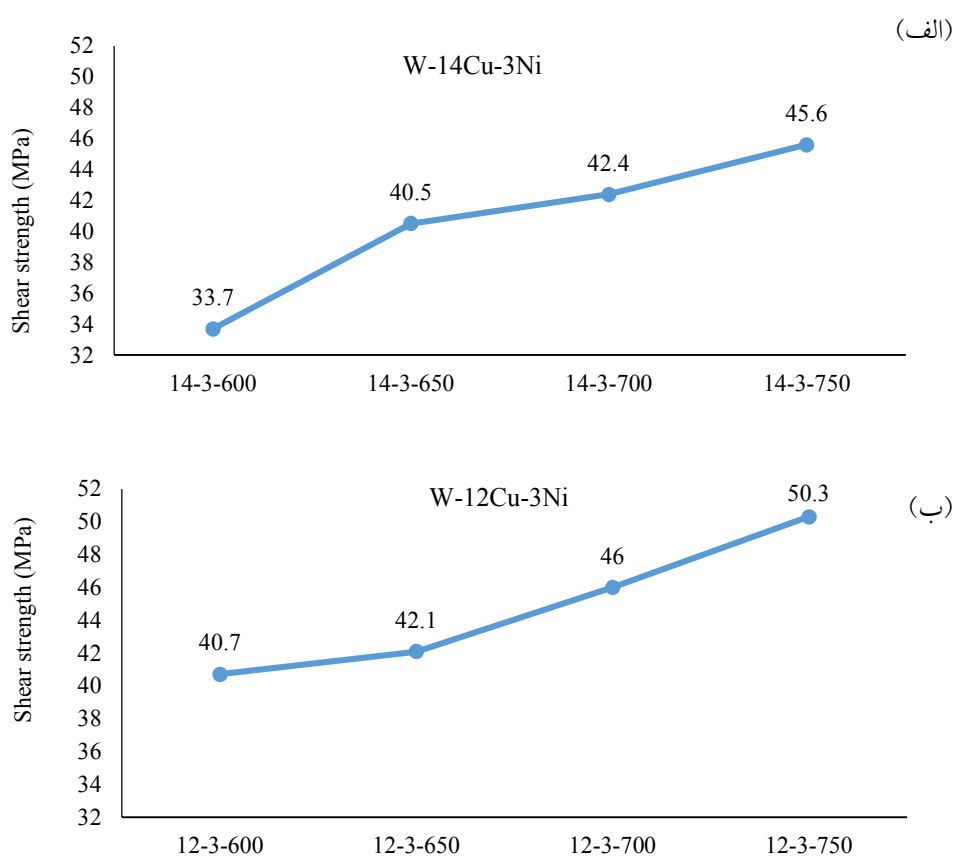
ادامه شکل ۳.

استحکام برشی جوش می شود این مورد را بدین گونه می توان توجیح کرد که به دلیل نرم بودن ذاتی عنصر مس افزایش این عنصر باعث کاهش سختی و استحکام برشی می شود از طرفی با مشاهده و مقایسه شکل های (۶) تا (۹) می توان گفت با افزایش دمای فرایند، نیکل موجود در آلیاژ تنگستن به سمت مس خالص نفوذ می کند و در مرز آلیاژ تنگستن با مس خالص ترکیب نیکل یکنواخت تر شده و در دو طرف مرز برابر می شود و با افزایش نفوذ عنصر نیکل، استحکام جوش در ناحیه فصل مشترک افزایش می یابد، همچنین مشاهده شکل (۳) نشان می دهد که تقریباً هیچ خلل و فرجی در ریزساختار فصل مشترک دوفلزی دیده نمی شود.

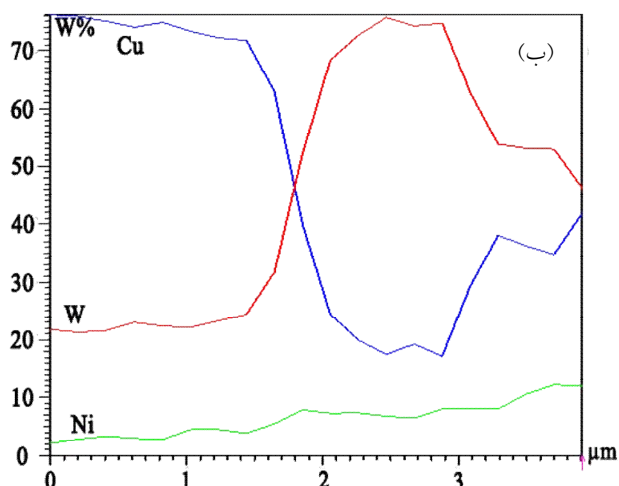
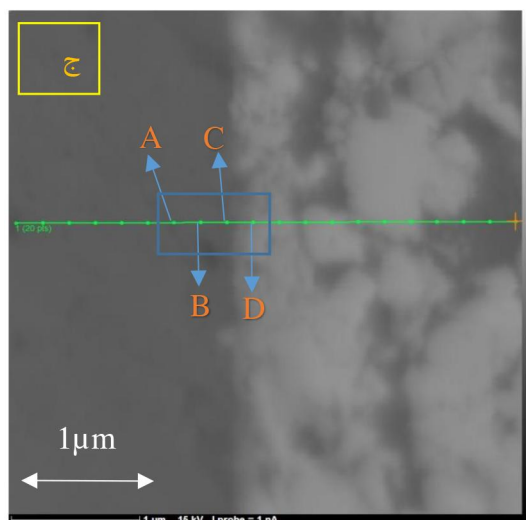
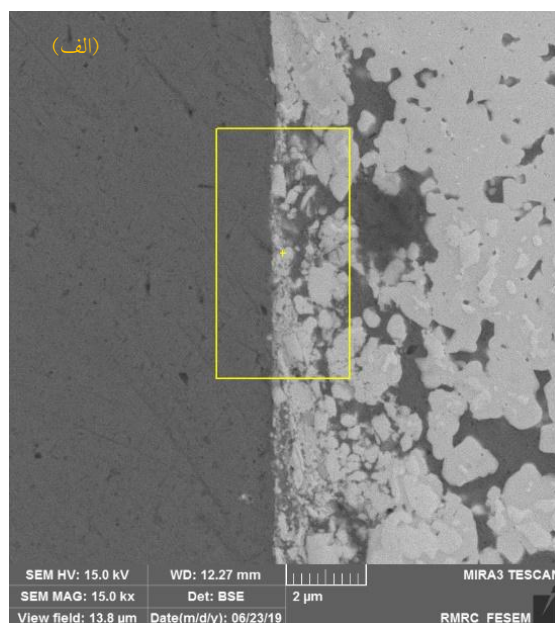
شکل های (۴) تا (۶) و (۸) نشان می دهند که دوفلزی های W-14Cu-3Ni / مس خالص و W-12Cu-3Ni / مس خالص که در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد تفجوشی شده اند نسبت به نمونه های دیگر دارای کمترین سختی و استحکام برشی هستند و در شکل های (۴)، (۵)، (۷) و (۹) دیده می شود که با افزایش دمای فرایند، تفجوشی بهتر انجام شده و استحکام برشی افزایش یافته است از طرف دیگر با افزایش دمای فرایند، انحلال، رخنه و نفوذ اتم ها در یکدیگر بیشتر شده و سختی نیز در ناحیه جوش افزایش یافته است. همچنین با مشاهده و مقایسه شکل های (۴) و (۵) نتیجه گرفته می شود که افزایش درصد مس در آلیاژ اولیه باعث کاهش سختی و



شکل ۴. سختی ویکرز کلیه نمونه‌های سینتر شده (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۵. نمودار تغییرات مقاومت برشی بعد از عملیات تف‌جوشی:  
الف) نمونه W-14Cu-3Ni / مس خالص و ب) نمونه W-12Cu-3Ni / مس خالص

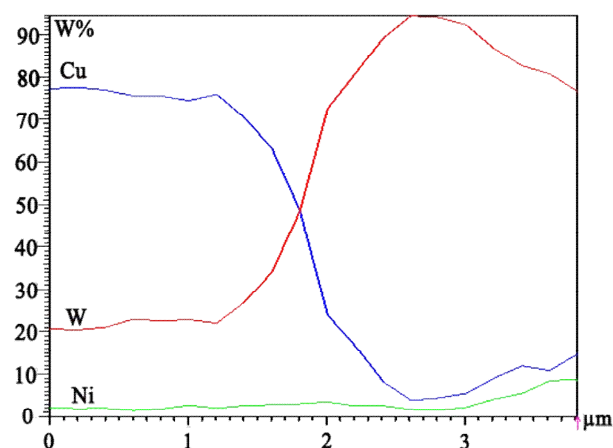
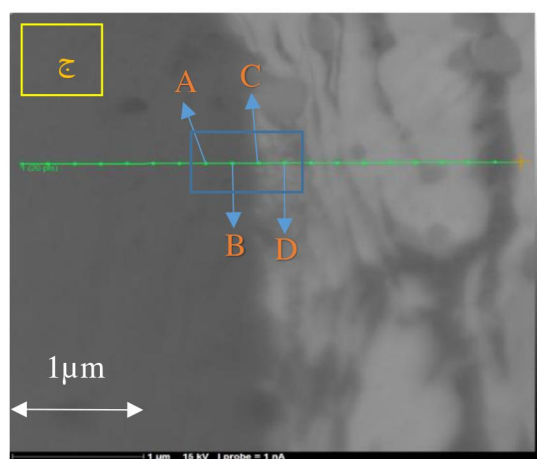
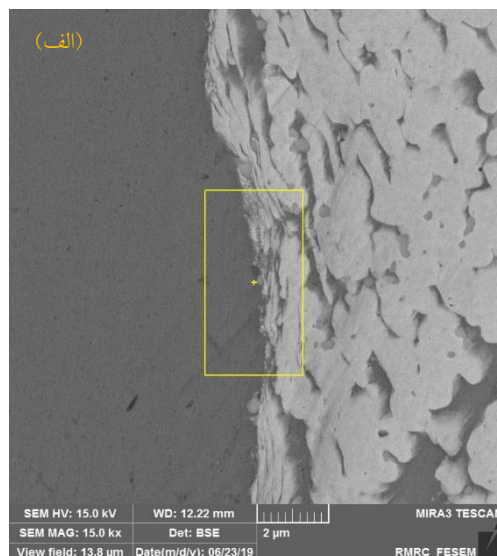


W	Cu	Ni	عنصر	(د)
۲۳/۲۹	۷۲/۲۲	۴/۴۸	A	درصد وزنی
۲۴/۴۱	۷۱/۷۵	۳/۸۴	B	درصد وزنی
۳۱/۶۸	۶۲/۸۵	۵/۴۷	C	درصد وزنی
۵۲/۰۹	۴۰/۰۴	۷/۸۷	D	درصد وزنی

شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از نمونه W-14Cu-3Ni / مس خالص (دمای تفجوشی ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد): (الف) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر، (ب) نمودار توزیعی خطی، (ج) محل بررسی‌های نقطه‌ای و (د) اطلاعات بررسی نقطه‌ای

مناسب به منظور ذوب و رخنه کامل مس و نیکل به داخل اسکلت متخلخل تنگستن است که باید به دقت کنترل شود.

بنابراین عوامل مهم ایجاد جوش متالورژیکی در این دوفلزی از روش تفجوشی با قوس پلاسما، تنظیم دما و مدت زمان



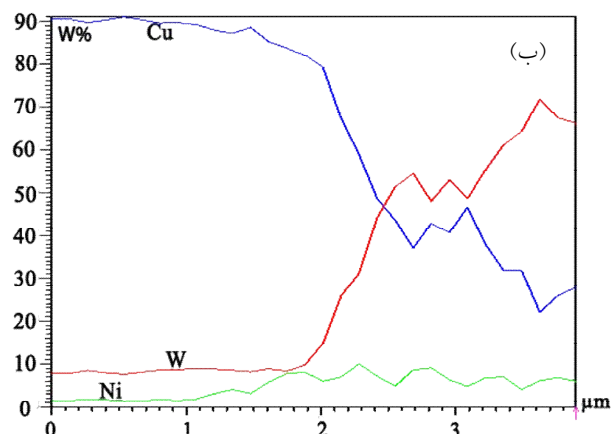
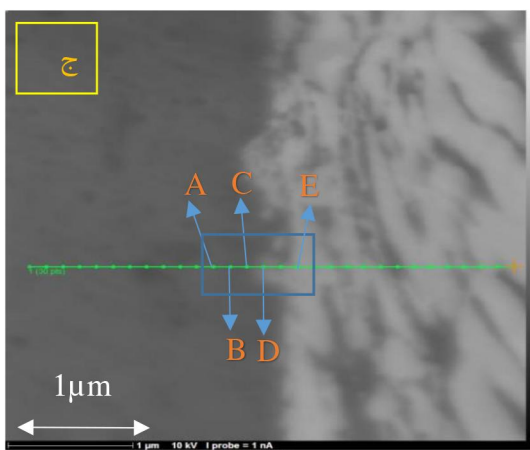
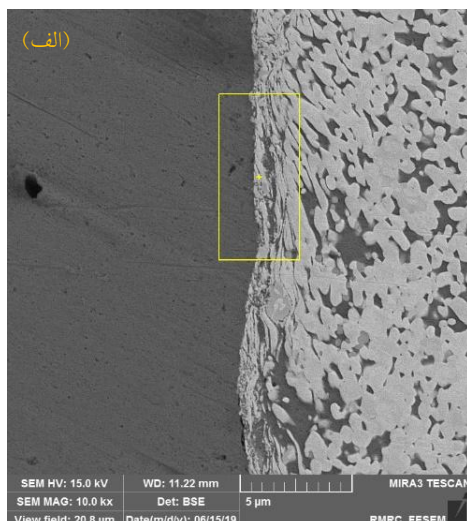
W	Cu	Ni	عنصر	(د)
۳۴/۱۴	۶۳/۰۳	۲/۸۳	درصد وزنی A	
۴۸/۴۷	۴۸/۴۶	۳/۰۷	درصد وزنی B	
۷۲/۵۹	۲۳/۹۱	۳/۵۰	درصد وزنی C	
۸۰/۸۳	۱۶/۶۲	۲/۵۵	درصد وزنی D	

شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از نمونه W-14Cu-3Ni / مس خالص (دمای تفجوشی ۵۰ درجه سانتی‌گراد): الف) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر، ب) نمودار توزیعی خطی، ج) محل بررسی‌های نقطه‌ای و د) اطلاعات بررسی نقطه‌ای

#### ۴- نتیجه‌گیری

مس خالص و آلیاژ تنگستن-مس-نیکل به وجود آمده است. در تحقیقات انجام شده پیش از این، اتصال مس به آلیاژهای تنگستن به صورت متالورژیکی و ایجاد چنین جوش یکنواخت و بدون عیبی تاکنون تصویربرداری و گزارش نشده است.

از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی به دست آمده از فصل مشترک جوش می‌توان نتیجه گرفت یک جوش کاملاً پیوسته و بدون عیب با یک مرز تک‌ساختار (مونولیتیک) در فصل مشترک

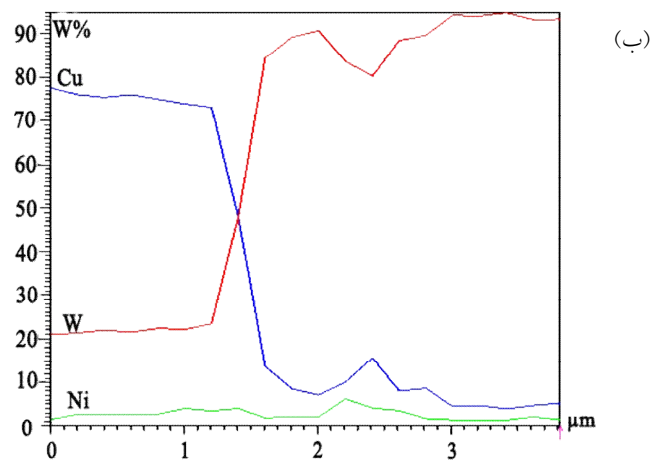
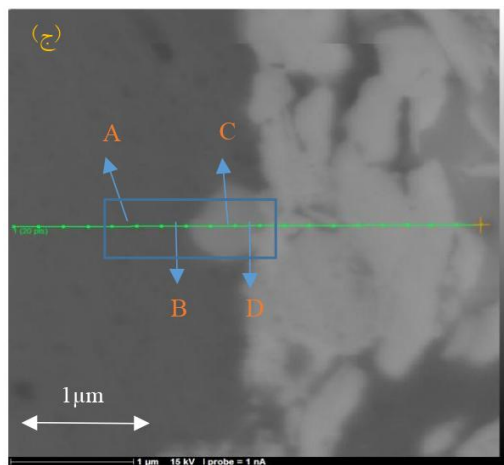
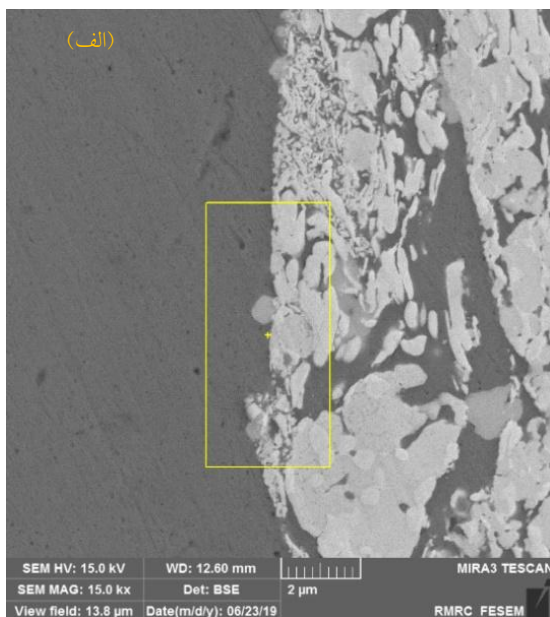


W	Cu	Ni	عنصر	(د)
۲۲/۰۳	۷۳/۳۸	۴/۵۹	درصد وزنی A	
۲۰/۹۶	۷۲/۷۹	۶/۲۵	درصد وزنی B	
۲۳/۸۷	۶۹/۷۷	۶/۳۶	درصد وزنی C	
۳۳/۲۸	۶۲/۳۵	۴/۳۸	درصد وزنی D	
۵۰/۱۶	۴۵/۵۰	۴/۳۴	درصد وزنی E	

شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از نمونه W-12Cu-3Ni / مس خالص (دمای تفجوشی ۶۰۰ درجه سانتی گراد): الف) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر، ب) نمودار توزیع خطی، ج) محل بررسی‌های نقطه‌ای و د) اطلاعات بررسی نقطه‌ای

سانتی‌گراد مس تحت فشار دستگاه تفجوشی با قوس پلازما خمیری شده و از قالب بیرون می‌زند و امکان افزایش بیشتر دما وجود نداشت.

• با افزایش دمای سینتر تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و افزایش نسبت نیکل به مس مشاهده می‌شود که استحکام برشی جوش افزایش می‌یابد. با افزایش دما بیش از ۷۵۰ درجه



W	Cu	Ni	عنصر	(د)
۲۳/۴۳	۷۳/۱۲	۳/۴۵	درصد وزنی A	
۸۴/۴۶	۱۳/۶۷	۱/۸۷	درصد وزنی B	
۹۰/۷۱	۷/۱۵	۲/۱۴	درصد وزنی C	
۸۳/۶۹	۱۰/۰۹	۶/۲۳	درصد وزنی D	

شکل ۹. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از نمونه W-12Cu-3Ni / مس خالص (دمای تفجوشی ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد): الف) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر، ب) نمودار توزیع خطی، ج) محل بررسی‌های نقطه‌ای و د) اطلاعات بررسی نقطه‌ای

ایجاد یک پیوند فلزی مستقیم بین اتم‌های مس و تنگستن است، بدون اینکه نفوذ قابل ملاحظه‌ای مشاهده شود.

• به‌طور کلی در اتصال آلیاژ تنگستن به مس خالص در مرز

• از نظر مکانیزم اتصال جوش در فصل مشترک در تصاویر با بزرگنمایی صد هزار برابر، یک مرز مونولیتیک شبیه به مرز دانه بین مس و تنگستن مشاهده می‌شود که نشان از

### تشکر و سپاسگزاری

بدین وسیله کمال سپاس و تشکر از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، سرکار خانم فرشته رحمانی هریس، جناب آقای افشین حیدری و همه عزیزانی که ما را در انجام این پژوهش و تحقیق یاری کردند را ابراز می‌دارم.

دو فلز نفوذ بسیار اندکی مشاهده شد و در بزرگنمایی‌های بالا این ناحیه نفوذ چنددهم میکرون اندازه‌گیری شد که ناحیه نفوذ کوچکی محسوب می‌شود. به عبارت دیگر در ایجاد جوش بین مس و تنگستن، مکانیزم عمده، قرارگیری اتم‌ها در یک مرز بسیار نازک است که در آن اتم‌های دو فلز در برد نیروهای بین اتمی قرار گرفته و جوش برقرار شده است.

### واژه‌نامه

1. bimetal
2. spark plasma sintering
3. direct current
4. International Seminar on Science Education
5. functionally graded material
6. energy dispersive X-ray spectroscopy
7. field-emission scanning electron microscopes
8. monolithic
9. X-ray powder diffraction
10. line analysis

### مراجع

1. Chau, C. K., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., and Sing, S. L., "Review on Melting of Multiple Metal Materials in Additive Manufacturing", School of Mechanical and Aerospace Engineering, NTU Additive Manufacturing Centre. Singapore, *International Conference on Progress in Additive Manufacturing*. pp. 170-175, 2014.
2. Abdolahi, E., and Ehsani, N., "Arc Plasma Sintering of Powder Metallurgy Components", *Journal of the Technical Manufacturing and Engineering*, Vol. 46, pp. 35-43, 1394.
3. Guillon, O., Gonzalez, J., Dargatz, B., Kessel, T., Schiering, G., and Herrmann, M., "Field-Assisted Sintering Technology/Spark Plasma Sintering: Mechanisms, Materials, and Technology Developments", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 16, No. 7, pp. 830-840, 2014.
4. Suárez, M., Fernández, A., Kessel, H., Hennicke, J., and Menéndez, J., *Challenges and Opportunities for Spark Plasma Sintering: A Key Technology for a New Generation of Materials*, www.IntechOpen.com Open Access Book. Chapter 13. 2013.
5. Tiwari, D., Basu, B., and Biswas, K., "Simulation of Thermal and Electric Field Evolution During Spark Plasma Sintering", *Ceram Int*. Vol. 35, pp. 699-708, 2008.
6. Munir, Z., Quach, D., and Ohyanagi, M., "Electric Current Activation of Sintering: A Review of the Pulsed Electric Current Sintering Process", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 94, No. 1, pp. 1-19, 2011.
7. Yusefi, A., and Parvin, N., "Fabrication of Three Layered W-Cu Functionally Graded Composite via Spark Plasma Sintering", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 114, pp. 196-202, 2017.
8. Lungua, M., Lucaci, M., and Tsakiris, V., "Development and Investigation of Tungsten Copper Sintered Parts for Using in Medium and High Voltage Switching Devices", *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017.
9. Tang, X., Zhang, H., and Du, D., "Fabrication of W-Cu Functionally Graded Material by Spark Plasma Sintering Method", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 42, pp. 193-199, 2014.
10. Autissier, E., Richou, M., and Minier, L., "Elaboration and Thermomechanical Characterization of W/Cu Functionally Graded Materials Produced by Spark Plasma Sintering for Plasma Facing Components", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 98-99, pp. 1929-1932, 2015.
11. German, R., Suri, P., and Park, S., "Liquid Phase Sintering", *Journal of Materials Science*, Vol. 44, pp. 1-39, 2009.
12. Lezanski, J., and Rutkowski, W., "Infiltration of a Liquid in Sintered Tungsten - 3 Stages of Infiltration", *Powder Metallurgy International*, Vol. 19, pp. 29-31, 1987.
13. Lungua, M., Tsakirisa, V., Enescua, E., Ptroia, D., Marinescua, V., Tlpeanua, D., Pavelescub, D., Dumitrescuc, Gh., and Radulian, A., "Development of W Cu Ni Electrical Contact Materials with Enhanced Mechanical Properties by Spark Plasma Sintering Process", *3rd International Congress on Advances in Applied Physics and Materials Science, Antalya, Turkey*, Vol. 145, pp. 327-330, 2014.
14. Xu, L., Yan, M., Peng, J., Srinivasakannan, C., Xia,

Y., Zhang, L., Chen, G., Xia, H., and Wang, S.,  
“Influences of Temperatures on Tungsten Copper

Alloy Prepared by Microwave Sintering”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 611, pp. 34-37, 2014.

[ DOR: 20.1001.1.2251600.1399.39.4.4.4.8 ]

[ DOI: 10.47176/jame.39.4.3513 ]