



## نشریه علوم و مهندسی سطح

# بررسی ریزساختاری اتصال نفوذی روکش تنگستن بر زیرلایه مولیبدن به روش سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای

مجتبی علی‌نژاد حقیقی، فرهاد شهریاری\*

دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شیراز

## چکیده

## واژگان کلیدی:

روکش کاری تنگستن بر مولیبدن

اتصال نفوذی

سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای ریزساختار

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۱۴

در بسیاری از لامپ‌های تولید پرتو ایکس استفاده شده در صنعت پزشکی، مانند تجهیزات رادیولوژی و سی تی اسکن، برای ساخت قطعات حساس آند چرخان از روکش ضخیم تنگستن بر مولیبدن بهره‌گیری می‌شود. یکی از روش‌های اعمال این پوشش، فرایند جوشکاری سطحی است که در صورت کنترل ریزساختار فصل مشترک با فرایندهای پیشرفته نظیر سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای (SPS) می‌تواند پاسخگوی نیازهای مهندسی برای کاربرد آند باشد. این روش با اعمال جریان مستقیم پالسی، نرخ‌های بالای حرارت‌دهی و نفوذ آندی را ممکن می‌سازد و بهبود چشمگیری در بازده فرآیند اتصال ایجاد می‌کند. در این پژوهش، برای نخستین بار، مقاطع مدور تنگستن و مولیبدن خالص با استفاده از SPS به طور موفقیت‌آمیز جوشکاری شدند. تأثیر پارامترهایی مانند دمای جوشکاری، نسبت طول به قطر (L/D) و عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر ریزساختار و عمق نفوذ جوش بررسی شد. افزایش دما از ۱۵۰۰ به ۱۶۰۰ °C موجب افزایش پهناي فصل مشترک جوش از ۱/۲ به ۱/۸ میکرومتر شد. با این حال، در دمای ۱۶۰۰ °C ناپیوستگی‌هایی در فصل مشترک مشاهده شد. در مقابل، جوشکاری در دمای ۱۵۵۰ °C با پهناي فصل مشترک ۱/۷ میکرومتر (بیش از ۴ برابر روش‌های نفوذی معمولی تحت شرایط دمایی و زمانی مشابه)، بهترین نتایج را ارائه داد. همچنین، عملیات حرارتی در دمای ۱۴۵۰ °C در هیدروژن باعث بهبود کیفیت اتصال و رفع عیوب جوش شد. نتایج نشان داد تکنیک SPS می‌تواند پوشش تنگستن بر مولیبدن با کیفیت بالا و ریزساختار مطلوب ایجاد نموده و به پیشبرد فناوری‌های پوشش‌دهی و اتصال برای قطعات حساس کمک کند.

DOI: 10.22034/ISSST.2025.2049284.1636

## Microstructural Analysis of Diffusion Bonding of Tungsten Cladding on Molybdenum Using Spark Plasma Sintering Method

### Abstract

In many X-ray tubes used in the medical industry, such as radiology and CT scan equipment, a thick tungsten cladding over molybdenum is employed to fabricate the sensitive rotating anode components. One method for cladding is surface welding, which, when combined with Spark Plasma Sintering (SPS) and control of the joint microstructure, can effectively meet the engineering requirements for anode applications. This method, by applying direct pulsed current, enables high heating rates and atomic diffusion, significantly enhancing the efficiency of the bonding process. In this study, for the first time, round samples of pure tungsten and molybdenum were successfully welded using SPS. The effects of parameters such as welding temperature, length-to-diameter ratio (L/D), and post-welding heat treatment on the microstructure and weld diffusion depth were examined. The results showed that increasing the welding temperature from 1500°C to 1600°C increased the weld diffusion depth from 1.2 to 1.8 micrometers. However, at 1600°C, discontinuities were observed at the joint interface. In contrast, welding at 1550°C with a diffusion depth of 1.7 micrometers (more than four times higher than conventional bonding methods under similar conditions) yielded the best results. Additionally, heat treatment at 1450°C in a pure hydrogen atmosphere significantly improved the weld quality and eliminated welding defects. The results demonstrate that using the SPS technique can produce high-quality tungsten coating on molybdenum with defect-free microstructures, advancing bonding technologies for high-tech industrial applications.

**Keywords:** Tungsten to Molybdenum Cladding, Diffusion Bonding, Spark Plasma Sintering, Microstructure.

\* Corresponding author E-mail: shahriari@sutech.ac.ir.

## ۱- مقدمه

تنگستن و آلیاژهای آن به طور گسترده به عنوان آند دوار برای تولید پرتو ایکس در لامپ‌های پرتو ایکس دستگاه‌های تشخیص پزشکی نظیر سی تی اسکن استفاده می‌شوند. فرآیند تولید پرتو ایکس در این لامپ‌ها با تولید مقدار زیادی گرما همراه است. در این لامپ‌ها، یک روکش ضخیم از جنس تنگستن بر روی زیرلایه‌ای از جنس مولیبدن یا آلیاژهای آن اتصال داده می‌شود. در زوج تنگستن - مولیبدن، روکش تنگستن به دلیل افزایش انتقال حرارت و زیرلایه مولیبدن به منظور افزایش ظرفیت حرارتی مجموعه به کار می‌رود. استفاده از روش‌های مناسب روکش‌کاری یا اتصال این دو فلز به منظور حفظ یکپارچگی ساختاری، انتقال مؤثر حرارت از آند و جلوگیری از افزایش موضعی بیش از حد دما در لامپ پرتو ایکس از اهمیت بالایی برخوردار است [۱ و ۲].

تاکنون روشهای مختلفی برای روکش‌کاری و اتصال فلزات تنگستن و مولیبدن و آلیاژهای آنها به یکدیگر مورد استفاده قرار گرفته است، از جمله بریزینگ [۳]، جوشکاری لیزری [۴ و ۵]، جوشکاری پرتو الکترونی [۶ و ۷]، جوشکاری مقاومتی نقطه ای [۸ و ۹]، جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی [۱۰] و جوشکاری نفوذی حالت جامد [۱۱ و ۱۲]. از جمله مزایای روکش‌کاری با اتصال نفوذی می‌توان به استحکام جوش نزدیک به فلز پایه، ساختار یکنواخت ناحیه جوش و عاری از مناطق متأثر از حرارت (HAZ)، حداقل اعوجاج و تنشهای پسماند و عدم نیاز به ماده پرکننده اشاره کرد [۱۳ - ۱۵]. روش اتصال نفوذی با استفاده از سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای به عنوان یک فناوری جدید شناخته می‌شود که با

اعمال جریان مستقیم پالسی، امکان نرخ‌های بالای حرارت‌دهی و افزایش نفوذ اتمی را فراهم می‌آورد و در نتیجه باعث افزایش بازده فرآیند اتصال می‌شود [۱۶ و ۱۷]. در سال‌های اخیر، مطالعات محدودی در خصوص اتصال نفوذی آلیاژهای تنگستن و مولیبدن با استفاده از سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای انجام شده است. به عنوان نمونه، یانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶] اتصال نفوذی آلیاژ پایه مولیبدنی TZM به آلیاژ تنگستن - رنیوم (W-Re) را با استفاده از سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای پودرهای فشرده‌شده بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که اتصال موفق این آلیاژها در بازه دمایی ۱۳۰۰ تا ۱۶۰۰ °C به مدت ۳۰ دقیقه و بدون استفاده از هرگونه لایه پرکننده صورت گرفته است. همچنین، فرآیند تبلور در دمای ۱۵۰۰ °C در هر دو آلیاژ TZM و W-Re رخ داده که موجب ایجاد اتصالی عاری از ترکیبات بین‌فلزی، ناپیوستگی‌ها، میکروترک‌ها و حفره‌ها گردیده است. در پژوهشی دیگر، هان<sup>۲</sup> و همکاران [۱] موفق به ایجاد اتصال گرادیانی آلیاژهای TZM و تنگستن - رنیوم با استفاده از روش سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای پودرهای فلزی در قالب گرادیانی برای استفاده در آند لامپ پرتو ایکس دستگاه سی تی اسکن شدند. نتایج نشان داد که فرآیند فشرده‌سازی و اتصال این آلیاژها با استفاده از قالب گرادیانی به‌طور همزمان انجام می‌شود. چگالی نسبی حاصل در این تحقیق بیش از ۹۸ درصد بوده و اتصال بهینه بدون حفره و ترک در دمای ۱۶۰۰ °C، فشار ۳۰ MPa و زمان ۸ دقیقه به‌دست آمده است. در تحقیق جداگانه‌ای، لیو<sup>۳</sup> و همکاران [۱۸] اتصال آلیاژ TZM به تنگستن استحکام‌دهی شده با ذرات پراکنده‌شده اکسیدی را با استفاده از سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای بررسی کردند. نتایج

<sup>۱</sup> Liu

<sup>۱</sup> Yang

<sup>۲</sup> Han

ریزساختار فصل مشترک جوش بررسی گردید. نویسندگان این مقاله بر این باورند که یافته‌های این تحقیق می‌تواند در اتصال نفوذی روکش تنگستن به مولیبدن و آلیاژهای آنها برای کاربردهای مختلف صنعتی مفید واقع شود.

## ۲- مواد و روش‌های آزمایش

میلگردهای تنگستن و مولیبدن خالص تجاری با خلوص ۹۹/۹۹ درصد و قطر ۱۸ میلی‌متر تهیه شدند. سپس این میلگردها با استفاده از ماشین وایرکات به نمونه‌های میلگرد با طول ۴۰ میلی‌متر و نمونه‌های دیسکی با طول ۸ میلی‌متر تبدیل شدند. پیش از انجام عملیات اتصال، سطح نمونه‌ها به صورت آینه‌ای پولیش گردید. عملیات اتصال نفوذی نمونه‌ها با استفاده دستگاه SPS تولید شرکت‌های دانش‌بنیان داخلی با دقت اندازه‌گیری دما تا ۵ درجه سانتیگراد انجام شد. همچنین فرآیند اتصال با جریان مستقیم پالسی (۱۰۰ میلی‌ثانیه روشن، ۱۰ میلی‌ثانیه خاموش) و خلأ<sup>۱</sup> ۱۰<sup>-۵</sup> Torr در دماهای ۱۵۰۰، ۱۵۵۰ و ۱۶۰۰ °C به مدت ۳۰ دقیقه و با فشار ۵۰ MPa انجام گرفت.

برای بررسی اثر عملیات حرارتی آنیل بر ریزساختار جوش، نمونه‌های جوشکاری‌شده در دمای ۱۴۵۰ °C به مدت یک ساعت در اتمسفر هیدروژن خالص تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. جدول ۱ پارامترهای مختلف نمونه‌های جوشکاری‌شده را نشان می‌دهد.

برای بررسی ریزساختار و کیفیت فصل مشترک جوش، ابتدا نمونه‌ها با استفاده از دستگاه وایرکات بریده شده و سپس به‌طور گرم مانت شده و سطح مقطع مورد بررسی به صورت آینه‌ای پولیش گردید. ریزساختار جوش نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM)

این تحقیق نشان داد با حضور ذرات اکسید ایتیم، پیوند متالورژیکی عالی بدون عیوب و عمق نفوذ ۳ میکرومتر در دمای ۱۵۰۰ °C حاصل شده است.

علاوه بر تحقیقات اشاره شده، مطالعات موجود نشان می‌دهند که عملیات حرارتی پس از جوش تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر ریزساختار فصل مشترک و خواص مکانیکی اتصالات نفوذی دارد. به عنوان مثال، دینگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۹] اثر دمای آنیل را بر اتصال نفوذی آلیاژهای منیزیم و آلومینیوم بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش دمای آنیل، وسعت ناحیه نفوذی افزایش یافته و میزان تنش‌های پسماند کاهش می‌یابد. در مطالعه دیگری، ارلی<sup>۲</sup> و همکاران [۲۰] نشان دادند که آنیل اتصال نفوذی تنگستن خالص به مولیبدن خالص در دماهای بالاتر از ۱۹۰۰ °C به مدت ۱۰۰ ساعت در خلأ، عمق نفوذ اتصال را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد و اندازه و تعداد حفره‌های کرکندال نیز با افزایش دما کاهش می‌یابد. با وجود اهمیت بالای علمی و صنعتی این موضوع، تحقیقات اندکی بر روی اتصال نفوذی مولیبدن به تنگستن با استفاده از سیتترینگ پلاسمای جرقه‌ای صورت گرفته است. بر اساس بهترین دانسته‌های نویسندگان این مقاله، تاکنون پژوهشی در خصوص اتصال نفوذی مولیبدن به تنگستن به صورت توده‌ای با استفاده از سیتترینگ پلاسمای جرقه‌ای و اثر عملیات حرارتی آنیل در دمای پایین‌تر از فرآیند جوشکاری در اتمسفر هیدروژن بر ریزساختار فصل مشترک جوش انجام نشده است. با توجه به نقش تعیین‌کننده ریزساختار بر کیفیت اتصال روکش، در این پژوهش به بررسی ریزساختاری فصل مشترک اتصال تنگستن به مولیبدن پرداخته می‌شود. همچنین، در این پژوهش برای اولین بار اثر نسبت طول به قطر نمونه‌ها بر

<sup>۱</sup> Ding

<sup>۲</sup> Erley

نمونه توزیع نامنظم و نامناسب عناصر را نشان می‌دهد (شکل ۱ج). ایجاد ترک‌ها و ناپیوستگی‌ها در فصل مشترک نمونه میلگردی ممکن است ناشی از عدم ایجاد جرقه مناسب در فصل مشترک تنگستن و مولیبدن به دلیل افت جریان ناشی از مقاومت الکتریکی بالاتر نمونه‌های میلگردی باشد. از سوی دیگر، همانطور که در شکل ۱د دیده می‌شود، کاهش نسبت طول به قطر در نمونه MWD-1500 باعث افزایش چشمگیر پهنای اتصال در فصل مشترک شده و در نتیجه هیچگونه ترک یا ناپیوستگی مشاهده نمی‌شود. پروفایل غلظتی نشان می‌دهد که پهنای فصل مشترک در نمونه MWD-1500 به ۱/۲ میکرومتر می‌رسد که نشان‌دهنده ایجاد پیوند متالورژیکی نسبتاً مناسب بین مولیبدن و تنگستن است. بنابراین، در این پژوهش، هندسه دیسک برای ادامه بررسی‌ها انتخاب شد. این هندسه به کاربرد مدنظر یعنی اتصال یک ورق نازک حدود ۲ میلی‌متری بر یک دیسک مولیبدنی نیز نزدیکی بیشتری دارد.

مدل FEI-QUNTA FEG-450 مورد بررسی قرار گرفت و آنالیز عنصری فصل مشترک با استفاده از طیف‌سنجی توزیع انرژی پرتو ایکس (EDX) متصل به میکروسکوپ الکترونی اندازه‌گیری شد.

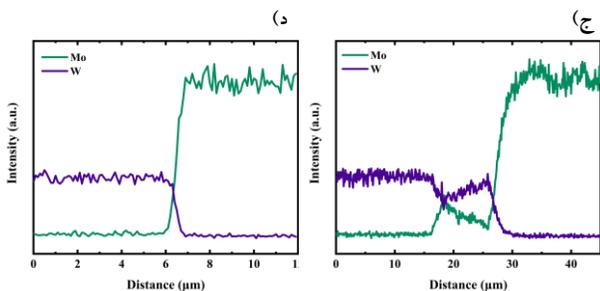
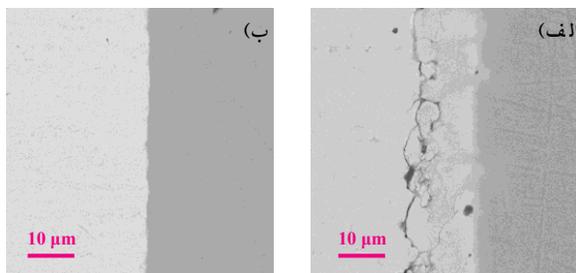
جدول ۱. نامگذاری و پارامترهای استفاده شده برای اتصال نمونه‌های مختلف در این پژوهش

نمونه	هندسه	دمای اتصال (°C)	عملیات حرارتی آنیل
MWR-1500	میله	۱۵۰۰	خیر
MWD-1500	دیسک	۱۵۰۰	خیر
MWD-1550	دیسک	۱۵۵۰	خیر
MWD-1550-T	دیسک	۱۵۵۰	بله
MWD-1600	دیسک	۱۶۰۰	خیر
MWD-1600-T	دیسک	۱۶۰۰	بله

### ۳- نتایج و بحث

موفقیت یک عملیات جوشکاری نفوذی به شدت به هندسه و اندازه نمونه‌های جوشکاری بستگی دارد. آگاهی از تأثیر هندسه بر ریزساختار و خواص فصل مشترک اتصال می‌تواند به بهبود خواص اتصال و کاهش هزینه‌های تولید منجر شود. در این پژوهش، نمونه‌های تنگستن و مولیبدن با قطر یکسان (۱۸ میلیمتر) ولی طول‌های متفاوت، با نسبت‌های طول به قطر ۰/۴ (نمونه‌های دیسک) و ۱/۴۴ (نمونه‌های میلگرد)، تحت عملیات اتصال در دمای °C ۱۵۰۰ قرار گرفتند (به ترتیب نمونه‌های MWD-1500 و MWR-1500).

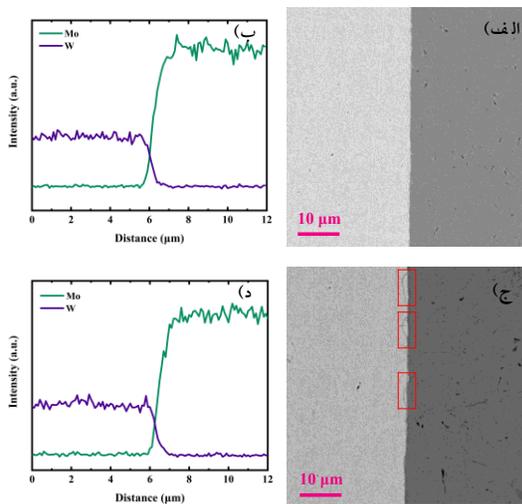
تصاویر میکروسکوپی الکترون برگشتی از فصل مشترک هر دو نمونه در شکل‌های الف و ب نشان داده شده است. در کلیه شکل‌های میکروسکوپی فاز تیره‌تر مولیبدن است. همانطور که در شکل الف مشاهده می‌شود، فصل مشترک جوش نمونه میلگردی MWR-1500 حاوی ترک‌های بزرگ و ناپیوستگی‌های فراوان است که نشان‌دهنده عدم پیوند متالورژیکی مناسب در فصل مشترک می‌باشد. همچنین نمودار غلظتی عناصر مولیبدن و تنگستن در فصل مشترک این



شکل ۱. ریزساختار و نمودار غلظت عناصر تنگستن و مولیبدن در نمونه‌های اتصال داده شده در دمای °C ۱۵۰۰: الف و ج) MWR-1500، ب و د) MWD-1500

برای بررسی اثر دمای فرآیند اتصال بر ریزساختار فصل

کمی بر افزایش پهنای فصل مشترک داشته است. این مشاهده با مطالعات پیشین تطابق دارد، به ویژه در مورد پهنای فصل مشترک جوش نفوذی آلیاژهای TZM و تنگستن-رنیوم که با افزایش دما به  $1600^{\circ}\text{C}$  کاهش می‌یابد و دلیل آن تغییر شکل پلاستیکی موضعی شدید در فصل مشترک عنوان شده است [۱۶]. بر اساس این نتایج، دمای بهینه برای اتصال نفوذی تنگستن به مولیبدن با استفاده از سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای در این پژوهش،  $1550^{\circ}\text{C}$  تعیین می‌شود.



شکل ۲. ریزساختار و پروفایل غلظت عناصر تنگستن و مولیبدن در نمونه‌های اتصال داده شده در دماهای  $1550^{\circ}\text{C}$  و  $1600^{\circ}\text{C}$ : الف) و ب) MWR-1550، ج) و د) MWD-1600.

برای بررسی تأثیر اعمال جریان الکتریکی بر اتصال نفوذی تنگستن به مولیبدن، معادله قانون دوم فیک در دماهای  $1550^{\circ}\text{C}$  و  $1600^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳۰ دقیقه با در نظر گرفتن زوج نفوذی نیمه بینهایت حل شد. قانون دوم فیک به صورت زیر بیان می‌شود [۲۴ و ۲۵]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D\nabla^2 c$$

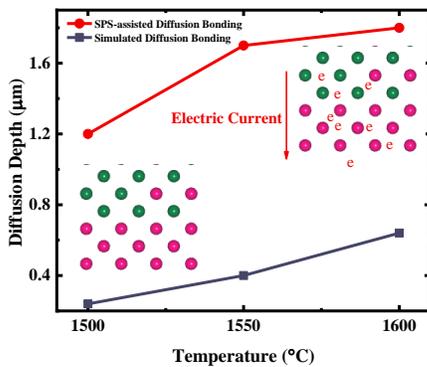
با شرایط مرزی به صورت:

مشترک و خواص جوش مولیبدن به تنگستن، دمای فرآیند به مقادیر  $1550^{\circ}\text{C}$  (نمونه MWD-1550) و  $1600^{\circ}\text{C}$  (نمونه MWD-1600) افزایش داده شد. تصویر میکروسکوپی الکترونی و نمودار غلظتی فصل مشترک جوش نمونه MWD-1550 به ترتیب در شکل‌های ۲الف و ۲ب نشان داده شده است. شکل ۲الف نشان می‌دهد که فصل مشترک جوش در نمونه MWD-1550 پیوستگی قابل ملاحظه‌ای دارد و عاری از هرگونه عیوب ظاهری همچون ترک و ناپیوستگی است. با توجه به حلالیت کامل دو فلز در یکدیگر [۲۱] انتظار تشکیل فازهای دیگر همچون فازهای بین‌فلزی وجود ندارد و اتمسفر عملیات انجام شده نیز تشکیل فاز اکسیدی را ترغیب نمی‌کند و در تصاویر میکروسکوپی نیز فاز مجهولی ظاهر نشده است. علاوه بر این، حررات کرکندال که معمولاً در اتصال نفوذی معمولی تنگستن و مولیبدن در دماهای بالا و زمان‌های طولانی تشکیل می‌شوند [۲۰]، با استفاده از سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای در این پژوهش تشکیل نشده‌اند. در ضمن با توجه به نمودار غلظتی فصل مشترک در شکل ۲ب، پهنای فصل مشترک به  $1/7$  میکرومتر رسیده است که این افزایش ناشی از وابستگی نمایی ضریب نفوذ عناصر مولیبدن و تنگستن در یکدیگر با دما است [۲۰]. علاوه بر این، نفوذ اتمی ناشی از مهاجرت الکترونی که از ویژگی‌های فرآیند SPS است، وابستگی نمایی با مقاومت ویژه الکتریکی فلزات مولیبدن و تنگستن دارد [۲۲] و این در حالی است که مقاومت ویژه هر دو فلز با افزایش دما افزایش می‌یابد [۲۳]. همانطور که در شکل ۲ج نشان داده شده است، با افزایش دما به  $1600^{\circ}\text{C}$ ، مقداری ناپیوستگی در فصل مشترک ایجاد شده است. همچنین، با توجه به نمودار غلظتی در شکل ۲د، پهنای فصل مشترک به  $1/8$  میکرومتر افزایش یافته است. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش  $50^{\circ}\text{C}$  در دمای فرآیند اتصال، تأثیر بسیار

بیان کرد [۲۲ و ۲۷]:

$$D_{eff} = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT} + \frac{A \cdot |Z^*| \cdot e \cdot \tau \cdot j}{RT}\right)$$

که در این رابطه  $A$  یک ثابت تجربی،  $Z^*$  ظرفیت مؤثر،  $e$  بار الکترون،  $\tau$  مقاومت ویژه‌ی ماده،  $j$  چگالی جریان،  $R$  ثابت جهانی گازها و  $Q$  انرژی فعالسازی است. در واقع رابطه فوق نشان می‌دهد، اعمال چگالی جریان الکتریکی ( $j$ ) می‌تواند باعث کاهش انرژی فعالسازی نفوذ و در نتیجه افزایش ضریب نفوذ مؤثر گردد. شکل ۳، پهنای فصل مشترک جوش حاصل از اتصال با روش سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای در این پژوهش را در مقایسه با اتصال نفوذی معمولی محاسبه‌شده با حل قانون دوم فیک نشان می‌دهد. همانطور که از شکل فوق به‌خوبی مشاهده می‌شود، با اعمال جریان الکتریکی، پهنای فصل مشترک نسبت به اتصال نفوذی معمولی ۴/۲۵ برابر شده است.



شکل ۳. پهنای فصل مشترک اتصال تنگستن به مولیبدن در دماهای مختلف اتصال در مقایسه با مقدار محاسبه شده برای اتصال نفوذی معمولی.

با وجود آنکه در گذشته اثر آنیل در دمای بالا در خلأ (بالا تر از  $1900^\circ\text{C}$ ) به مدت طولانی (۱۰۰ ساعت) بر اتصال نفوذی تنگستن به مولیبدن توسط محققان بررسی شده است [۲۰]، در این پژوهش اثر آنیل در دمای متوسط  $1450^\circ\text{C}$  به مدت

$$c = 0, \text{ for } x < 0, \text{ at } t = 0$$

$$c = 1, \text{ for } x > 0, \text{ at } t = 0$$

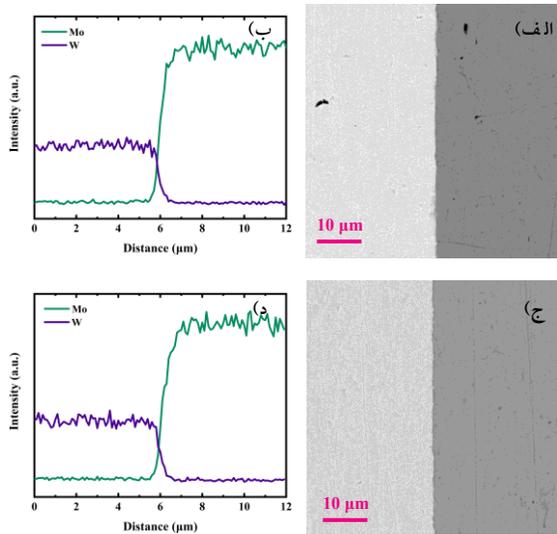
حل معادله دیفرانسیل به صورت زیر است:

$$c(x, t) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right]$$

با توجه به بالاتر بودن ضریب نفوذ تنگستن در مولیبدن نسبت به ضریب نفوذ مولیبدن در تنگستن، برای انجام محاسبات، ضریب نفوذ تنگستن در مولیبدن انتخاب شد. ضریب نفوذ تنگستن در مولیبدن در بازه  $1900^\circ\text{C}$  تا  $2268^\circ\text{C}$  به صورت رابطه نمایی زیر بیان می‌شود [۲۶]:

$$D_w = 3.6 \times 10^{-4} \exp(-515800/RT) \text{ (m}^2/\text{s)}$$

هرچند که بازه دمایی در این پژوهش از بازه دمایی صدق کننده در رابطه ضریب نفوذ تنگستن در مولیبدن کمتر است، با این وجود استفاده از این رابطه جهت تخمین عمق نفوذ همچنان مفید است. در واقع انتخاب ضریب نفوذ بیش از واقعیت، یک کران بالا از وضعیت نفوذ اتمی در غیاب مهاجرت الکتریکی نشان می‌دهد. مهاجرت الکتریکی یکی از پدیده‌های شناخته‌شده‌ای است که در اثر اعمال جریان مستقیم به یک ماده رسانا رخ می‌دهد. در این فرآیند، برخورد الکترون‌های در حال حرکت با اتم‌ها، نیرویی را به اتم‌های ماده‌ی رسانا وارد می‌کند که به آن باد الکترونی گفته می‌شود. این نیرو باعث جابه‌جایی اتم‌ها به سمت جاهای خالی شده و در نهایت منجر به اشغال آن‌ها می‌گردد. این نیرو در مقابل اثر میدان الکتریکی قرار می‌گیرد که نیرویی در جهت مخالف بر هسته‌های دارای بار مثبت وارد می‌کند و آن‌ها را در خلاف جهت حرکت الکترون‌ها به حرکت درمی‌آورد. در نتیجه، اتم‌ها تمایل دارند در جهت جریان الکترون‌ها حرکت کنند، در حالی که جاهای خالی در مسیر مخالف جابه‌جا می‌شوند. بررسی‌ها نشان داده‌اند که با در نظر گرفتن اثر مهاجرت الکتریکی، می‌توان ضریب نفوذ مؤثر  $D_{eff}$  را به صورت زیر



شکل ۴. ریزساختار و نمودار غلظت عناصر تنگستن و مولیبدن در نمونه آنیل شده: الف و ب) MWD-1550-T و ج و د) MWD-1600-T.

جدول ۲. مقایسه پهنای فصل مشترک مولیبدن به تنگستن در پژوهش حاضر با مطالعات پیشین

مرجع	شکل اولیه نمونه	پهنای فصل مشترک (μm)	فشار (MPa)	دما (°C) و زمان (دقیقه)	روش اتصال	اتصال
[۱۶]	پودری	≈ 2.2	20	1400 °C 30 min	SPS	Mo (TZM) to W-25%Re
[۱۶]	پودری	≈ 6.65	20	1500 °C 30 min	SPS	Mo (TZM) to W-25%Re
[۱۶]	پودری	≈ 3.1	20	1600 °C 30 min	SPS	Mo (TZM) to W-25%Re
[۱۸]	پودری	1.2	50	1400 °C 5 min	SPS	Mo (TZM) to W-ODS
[۱۸]	پودری	1.75	50	1500 °C 5 min	SPS	Mo (TZM) to W-ODS
[۱۸]	پودری	1.3	50	1600 °C 5 min	SPS	Mo (TZM) to W-ODS
[۲۰]	توده‌ای	0.43	4.83	1650 °C 3 h	اتصال نفوذی	Single crystalline Mo to single crystalline W
پژوهش حاضر	توده‌ای	1.7	50	1550 °C 30 min	SPS	MWD-1550
پژوهش حاضر	توده‌ای	1.8	50	1600 °C 30 min	SPS	MWD-1600

۱ ساعت در اتمسفر هیدروژن خالص بر روی دو نمونه MWD-1600 و MWD-1550 بررسی گردید. این نمونه‌ها به ترتیب با کدهای MWD-1600-T و MWD-1550-T نامگذاری شدند. شکل‌های الف و ب به ترتیب تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و پروفایل غلظتی فصل مشترک نمونه MWD-1550-T را نشان می‌دهند. همانطور که از این تصاویر مشاهده می‌شود، ریزساختار فصل مشترک جوش و پهنای فصل مشترک نسبت به حالت قبل از عملیات آنیل تغییری نکرده‌اند. با این حال، با بررسی تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (شکل ۴ج) و پروفایل غلظتی (شکل ۴د) نمونه MWD-1600-T، مشاهده می‌شود که با وجود عدم تغییر پهنای فصل مشترک، ناپوستگی‌های موجود در فصل مشترک پس از عملیات حرارتی حذف شده‌اند. این مشاهدات نشان‌دهنده این نکته است که عملیات آنیل در دمای پایین‌تر از دمای اتصال، اگرچه تأثیری بر پهنای فصل مشترک ندارد، اما می‌تواند در حذف عیوب و بهبود کیفیت اتصال مؤثر باشد. جدول ۲ نتایج این پژوهش را با نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین در مورد فلزات تنگستن، مولیبدن و آلیاژهای آنها مقایسه می‌کند. با مقایسه مقادیر به دست آمده در این پژوهش با سایر تحقیقات مشابه، می‌توان نتیجه گرفت که اتصال متالورژیکی مناسب بین تنگستن و مولیبدن با استفاده از روش سیتترینگ پلاسمای جرقه‌ای حاصل شده است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، ایجاد پوشش تنگستن بر زیرلایه مولیبدن خالص به صورت توده‌ای برای اولین بار با استفاده از تکنیک سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای به طور موفقیت‌آمیز انجام شد. همچنین، اثر دمای اتصال، نسبت طول به قطر نمونه‌ها و عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر ریزساختار و پهنای جوش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش دمای فرآیند از ۱۵۰۰ به ۱۶۰۰ °C موجب افزایش پهنای فصل مشترک جوش از ۱/۲ به ۱/۸ میکرومتر می‌شود. با این وجود، در دمای ۱۶۰۰ °C، افزایش پهنای فصل مشترک کمتر محسوس بوده و ناپیوستگی‌هایی در فصل مشترک مشاهده می‌گردد. در مقابل، فرایند سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای در دمای ۱۵۵۰ °C با پهنای فصل مشترک بهینه ۱/۷ میکرومتر (بیش از ۴ برابر روش‌های نفوذی معمولی تحت شرایط دمایی و زمانی مشابه) و ریزساختاری بدون عیب، بهترین نتایج را ارائه داد. علاوه بر این، عملیات حرارتی قطعات پس از اتصال در دمای ۱۴۵۰ °C در اتمسفر هیدروژن خالص نشان داد که اگرچه این عملیات تأثیر قابل توجهی بر افزایش عمق نفوذ ندارد، اما به طور مؤثری کیفیت اتصال را بهبود بخشیده و عیوب را برطرف می‌نماید.

#### ۵- مراجع

- Shy, Brazing porous tungsten and molybdenum using palladium and titanium foils, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 31 (2012) 284–287. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.10.007>.
- [4] P. Liu, K. Feng, G. Zhang, A novel study on laser lap welding of refractory alloy 50Mo–50Re of small-scale thin sheet, *Vacuum.* 136 (2017) 10–13. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.11.001>.
- [5] J. Long, L.-J. Zhang, J. Ning, S.-J. Na, Effect of ambient pressure change on pure tungsten laser spot welding, *Weld. World.* 66 (2022) 2133–2141. <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01372-8>.
- [6] A. Chatterjee, S. Kumar, R. Tewari, G.K. Dey, Welding of Mo-Based Alloy Using Electron Beam and Laser-GTAW Hybrid Welding Techniques, *Metall. Mater. Trans. A.* 47 (2016) 1143–1152. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3267-8>.
- [7] G. Chen, Q. Yin, X. Shu, Y. Bi, B. Zhang, J. Feng, Microstructure and properties of electron beam welded joints of tantalum and tungsten, *Weld. World.* 62(2018)775–782. <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0600-z>.
- [8] J. Ning, L.-J. Zhang, B.-Y. Yang, R.-Y. Ma, Y.-J. Sun, Improved quality of resistance spot welded joints for molybdenum sheets in lap configuration by adding titanium interlayer, *Mater. Res. Express.* 8(2021)066522. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac083d>.
- [9] J. Xu, X. Jiang, Q. Zeng, T. Zhai, T. Leonhardt, J. Farrell, W. Umstead, M.P. Effgen, Optimization of resistance spot welding on the assembly of refractory alloy 50Mo–50Re thin sheet, *J. Nucl. Mater.* 366 (2007) 417–425. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.03.030>.
- [10] H. Fujii, Y. Sun, H. Kato, Microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure Mo joints, *Scr. Mater.* 64 (2011) 657–660. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.12.014>.
- [11] Q. Yao, H. Cheng, J. Fan, H. Yan, C. Zhang, High strength Mo/Ti6Al4V diffusion bonding joints: Interfacial microstructure and mechanical properties, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 82 (2019), 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.04.009>.
- [12] J. Zhang, Y. Huang, Y. Liu, Z. Wang, Direct diffusion bonding of immiscible tungsten and copper at temperature close to Copper's melting point, *Mater. Des.* 137 (2018) 473–480.
- [1] C. Han, X. Yang, B. Nong, Z. Zhu, J. Zhang, One-step preparation, microstructure and properties of WRe/TZM gradient material for X-ray tube of CT scanner, *J. Mater. Res. Technol.* 15(2021)2646–2657. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.109>.
- [2] S. Webb, *The Physics of Medical Imaging*, CRC Press, 1988. <https://doi.org/10.1201/9780367805838>.
- [3] C.C. Lin, C.H. Shu, C. Chen, R.K. Shiue, H.J.

- system, *Bull. Alloy Phase Diagrams*. 5 (1984) 177–180. <https://doi.org/10.1007/BF02868956>.
- [22] S. Deng, T. Yuan, R. Li, M. Zhang, S. Xie, M. Wang, L. Li, J. Yuan, Q. Weng, Influence of electric current on interdiffusion kinetics of W-Ti system during spark plasma sintering, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 75 (2018) 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.04.014>.
- [23] P.D. Desai, T.K. Chu, H.M. James, C.Y. Ho, Electrical Resistivity of Selected Elements, *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 13 (1984) 1069–1096. <https://doi.org/10.1063/1.555723>.
- [24] P. Shewmon, *Diffusion in Solids*, Springer International Publishing, Cham, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-48206-4>.
- [25] H. Mehrer, *Diffusion in Solids*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71488-0>.
- [26] G. Neumann, C. Tuijn, Self-Diffusion and Impurity Diffusion in Group VI Metals, in: 2008: pp. 239–257. [https://doi.org/10.1016/S1470-1804\(08\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S1470-1804(08)00006-0).
- [27] S. Rudinsky, R. Gauvin, M. Brochu, The effects of applied current on one-dimensional interdiffusion between copper and nickel in spark plasma sintering, *J. Appl. Phys.* 116 (2014) 1–7. <https://doi.org/10.1063/1.4898158>.
- <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.052>.
- [13] T. Aravinda, H.B. Niranjana, B. Satish Babu, M. Udaya Ravi, Solid State Diffusion Bonding Process-A Review, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1013(2021)012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1013/1/012011>.
- [14] V.R. Saranam, B. Mullany, A. Tabei, S. Sreenevas, C. Evans, B.K. Paul, Surface topographical effects in the diffusion bonding of 316 stainless steel, *J. Mater. Process. Technol.* 296(2021)117173. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117173>.
- [15] M.-T. Chiang, K.-Y. Chiu, P.-C. Wu, S.-Y. Chang, Y.-K. Sun, T.-H. Chuang, Improvement of the Mechanical Properties of the Diffusion-Bonded 2024 Aluminum Alloy through Post-Weld Heat Treatments, *Metals (Basel)*. 12 (2022) 1738. <https://doi.org/10.3390/met12101738>.
- [16] Z. Yang, K. Hu, D. Hu, C. Han, Y. Tong, X. Yang, F. Wei, J. Zhang, Y. Shen, J. Chen, X. Wu, Diffusion bonding between TZM alloy and WRe alloy by spark plasma sintering, *J. Alloys Compd.* 764(2018)582–590. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.111>.
- [17] P. Dong, Z. Wang, W. Wang, S. Chen, J. Zhou, Understanding the spark plasma sintering from the view of materials joining, *Scr. Mater.* 123 (2016)118–121. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.06.014>.
- [18] D.-G. Liu, H.-R. Ma, C.-F. Ruan, L.-M. Luo, X. Zan, Z.-M. Wang, Y.-C. Wu, Effective joining between oxide dispersion strengthened tungsten-based material (ODS-W) and TZM alloy via spark plasma sintering technology, *Results Mater.* 9(2021)100175. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100175>.
- [19] Y. DING, J. WANG, M. ZHAO, D. JU, Effect of annealing temperature on joints of diffusion bonded Mg/Al alloys, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 28 (2018) 251–258. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64658-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64658-8).
- [20] W. Erley, H. Wagner, Volume interdiffusion in the molybdenum–tungsten system, *Phys. Status Solidi*. 6 (1971) 543–550. <https://doi.org/10.1002/pssa.2210060223>.
- [21] S. V. Nagender-Naidu, A.M. Sriramamurthy, P.R. Rao, The Mo–W (Molybdenum-Tungsten)