

## بررسی اثر میان لایه تیتانیومی بر خواص مکانیکی و ساختاری اتصال نفوذی فولاد- تنگستن

فرزاد صمدی<sup>۱</sup>، سیده زهرا انوری<sup>۲</sup>، محمد خدائی<sup>۳\*</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۲۰، ش.ص ۱۰۵-۱۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۱۲)

### چکیده

در این بررسی اتصال نفوذی فولاد- تنگستن با استفاده از لایه میانی تیتانیومی خالص انجام شد. نمونه‌ها در فیکسچر مناسب تحت فشار ۵ MPa درون کوره با اتمسفر آرگون در دماها و زمان‌های مختلف قرار گرفتند. تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌ها نشان‌دهنده تشکیل ناحیه نفوذی قابل تشخیص در فصل مشترک تنگستن-تیتانیوم و نفوذ بسیار کم تیتانیوم در فولاد است. همچنین با افزایش زمان و دمای فرایند، طول ناحیه نفوذی افزایش یافته است. نتایج آزمون طیف‌سنجی تفکیک انرژی پرتوی ایکس (EDS) نیز نفوذ تیتانیوم در تنگستن و نفوذ بسیار ناچیز تیتانیوم در فولاد را تایید کرد. نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس نمونه‌ها بیان‌گر حضور فازهای  $Ti-\alpha$ ،  $Ti-\beta$  و ترکیبات بین فلزی FeTi و  $Fe_2Ti$  در نمونه‌ها است. نتایج حاصل از ریزسختی‌سنجی نمونه‌ها نشان می‌دهد که بیش‌ترین سختی مربوط به نمونه 1000T1H در فصل مشترک تیتانیوم- فولاد بوده که علت آن حضور ترکیبات بین‌فلزی ( $Fe_2Ti$  و FeTi) است. با توجه به نتایج آزمون استحکام برشی، نمونه 950T1H دارای بیش‌ترین استحکام برشی بوده و با افزایش زمان و دمای اتصال، این میزان به دلیل افزایش ترکیبات بین‌فلزی کاهش یافته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمون‌ها، دمای ۹۰۰ و زمان ۱ ساعت دما و زمان بهینه برای جوشکاری نفوذی فولاد- تنگستن است.

**واژه‌های کلیدی:** تنگستن، فولاد، میان لایه تیتانیوم، جوشکاری نفوذی، ترکیبات بین‌فلزی.

<sup>۱</sup> - موسسه آموزش عالی دانش پژوهان، گروه مهندسی مواد، اصفهان، ایران

<sup>۲</sup> - استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

<sup>۳</sup> - استادیار، مرکز تحقیقات مهندسی پیشرفته، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، اصفهان، ایران

\*- نویسنده مسئول مقاله: khodai1358@gmail.com

## پیشگفتار

اتصال نفوذی، یک فرایند جوشکاری در حالت جامد بوده که در دمای بیش‌تر از نصف نقطه ذوب مواد انجام می‌شود. در نیروگاه‌های انرژی اتمی، جوشکاری نفوذی در ساخت اجزای راکتورها استفاده می‌گردد. غلاف‌کاری سرامیک با فلز بدون تغییر در ابعاد و یا مقاومت به خوردگی و اطمینان بالا، جوشکاری نفوذی را روشی ایده‌آل در صنایع هوافضا ساخته است.

تنگستن، ماده دیرگدازی است که برای کاربردهایی با اجزای در تماس با حرارت بالا مناسب شناخته شده است؛ اما با توجه به چگالی بالا و همچنین هزینه ساخت بالا، امروزه توجه ویژه‌ای به قطعات دو جنسی (Bimetals) می‌شود؛ اما اختلاف زیاد در نقطه ذوب این دو ماده روش جوشکاری ذوبی را غیرممکن کرده است. به علاوه تنگستن و فولاد خواص فیزیکی متفاوتی دارند به ویژه اختلاف در ضریب انبساط حرارتی که منجر به ایجاد تنش‌های حرارتی اضافه در اتصال تنگستن- فولاد می‌شود. به منظور کاهش تبعات حاصل از اتصال مستقیم دو فلز غیرمشابه، معمولاً از میان لایه بین آن دو استفاده می‌شود.

در تحقیقی کاندا<sup>۱</sup> و همکارانش [۱] اتصال تیتانیوم خالص به فولاد زنگ‌نزن رسوب‌سختی ۴-۱۷ را مورد مطالعه قرار دادند، اتصال در محدوده دمایی ۸۵۰ تا ۹۵۰ °C به مدت ۲ ساعت تحت تنش ۳/۵ MPa انجام شده است. فازهای تشکیل شده در فصل مشترک،  $\sigma$ ،  $\text{Fe}_2\text{Ti}$ ،  $\text{FeTi}$ ،  $\alpha\text{-Ti}$ ،  $\beta\text{-Ti}$  گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای فرایند، نفوذ افزایش یافته و میزان ترکیبات بین‌فلزی نیز افزایش می‌یابد. بیش‌ترین استحکام برشی مربوط به نمونه جوشکاری شده در دمای ۹۰۰ °C بوده است، با افزایش دما، میزان ترکیبات بین‌فلزی ترد نیز افزایش یافته است.

در یک بررسی لیو<sup>۲</sup> و همکارانش [۲] ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال نفوذی تنگستن/ فولاد با استفاده از لایه میانی وانادیوم/ نیکل را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی جوشکاری در دمای ۱۰۵۰ °C به مدت ۱ ساعت و

تحت فشار ۱۰ MPa انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که هیچ‌گونه ترکیب بین‌فلزی در فصل مشترک فولاد/ نیکل و وانادیوم/ تنگستن تشکیل نشده است. در فصل مشترک نیکل/ وانادیوم، ترکیبات  $\text{Ni}_2\text{V}$ ،  $\text{Ni}_3\text{V}$  و  $\text{NiV}_3$  تشکیل شده‌اند. استحکام کششی اتصال ۳۶۲ MPa گزارش شده است و شکست در فصل مشترک وانادیوم/ تنگستن رخ داده است. نتایج نانوسختی‌سنجی نشان داد که فصل مشترک به دلیل اثراتی چون تشکیل ترکیبات بین‌فلزی و استحکام‌بخشی به روش محلول جامد دارای سختی بالاتری نسبت به تنگستن و فولاد بوده است.

در پژوهشی باسوکي<sup>۳</sup> و همکاران [۳] اتصال نفوذی فولاد فریتی مارتنزیتی یوروفر را به تنگستن مورد بررسی قرار دادند. به‌منظور کاهش تنش‌های باقی‌مانده در فصل مشترک حین فرایند اتصال نفوذی که ناشی از اختلاف ضریب انبساط حرارتی تنگستن و فولاد است، یک صفحه از جنس نیوبیوم به عنوان لایه میانی استفاده شده و اتصال نفوذی به مدت یک ساعت در دمای ۱۰۵۰ °C انجام شد و فشار به گونه‌ای انتخاب شده است که کرنش خزشی در سمت فولاد یوروفر به ۸٪ برسد. آزمون کشش روی نمونه‌ها نشان داده‌است که نمونه از قسمت فصل مشترک نیوبیوم و فولاد یوروفر شکسته است. در این بررسی یک لایه سخت و شکننده ناشی از واکنش در فصل مشترک فولاد یوروفر و نیوبیوم تشکیل می‌شود که شامل کاربیدهای نیوبیوم  $\text{Nb}_2\text{C}$  و  $\text{Nb}_6\text{C}_5$  است [۳].

در پژوهش ژانگ<sup>۴</sup> و همکاران [۴] ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال نفوذی تنگستن/ فولاد فریتی با لایه میانی نیکل که در دمای ۹۰۰ °C تحت خلاء به مدت نیم تا ۲ ساعت اتصال داده شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش زمان نگهداری تا ۲ ساعت، یک لایه قابل تشخیص از ترکیب بین فلزی  $\text{Ni}_4\text{W}$  در فصل مشترک به وجود آمده است. حضور فازهای  $\text{Ni}_4\text{W}$  و محلول جامد  $\text{Ni(W)}$  در مقطع نمونه با زمان نگهداری دو ساعت توسط آنالیز پراش پرتوی ایکس گزارش شده است. طبق نتایج این تحقیق استحکام اتصالات با افزایش زمان نگهداری تا ۱ ساعت ابتدا افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر زمان نگهداری،

<sup>3</sup>- Basuki

<sup>4</sup>- Zhong

<sup>1</sup>-Kundu

<sup>2</sup>-Liu

به منظور ایجاد اتصال، نمونه‌ها در کوره با اتمسفر آرگون در دماهای (۸۰۰، ۸۵۰، ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی-گراد) و زمان‌های مختلف (۱ و ۲ ساعت) نگهداری شدند (از هر نمونه ۴ عدد).

یک عدد از نمونه‌های اتصال یافته به منظور بررسی‌های ریزساختاری، برش مقطعی و سپس مانت و پولیش و سپس توسط محلول ماربل اچ شده است و سه نمونه دیگر جهت اندازه‌گیری پروفایل سختی و استحکام برشی اتصال انتخاب شدند. برای تعیین فازها و درصد آن‌ها از روش پراش پرتو اشعه ایکس (XRD: Philips) با تابش  $\text{CuK}\alpha$  استفاده شد. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی تفکیک انرژی پرتوی ایکس (EDS) انجام شد، ریزسختی‌سنجی با استفاده از دستگاه ریزسختی‌سنجی با بار ۱۰۰ گرم انجام شد. برای سنجش استحکام برشی، فیکسچری (از جنس فولاد ۴۳۴۰) مطابق شکل ۲ و دستگاه آزمون کشش- فشار (Wolpert: FM2750) با نرخ کرنش ۰/۵ mm/sec استفاده شد.

کاهش می‌یابد. حضور فاز بین فلزی  $\text{Ni}_4\text{W}$  نیز موجب کاهش استحکام کششی اتصال شده است.

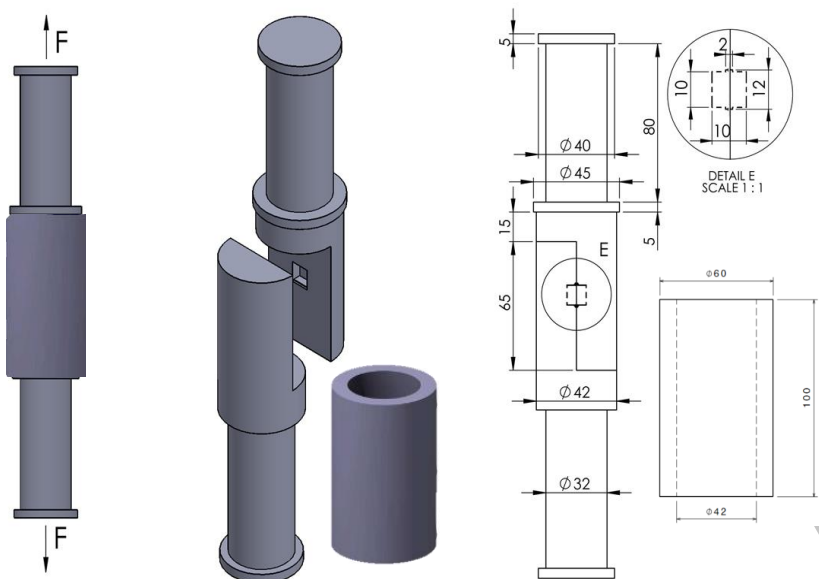
در تحقیق حاضر، تاثیر وجود میان لایه تیتانیوم و تاثیر دما و زمان اتصال نفوذی فولاد- تنگستن خالص تجاری بر استحکام و خواص ریزساختاری اتصال بررسی شده است.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش مفتول فولاد ساده کربنی کم کربن (St 37) و مفتول تنگستن خالص تجاری با قطر ۴/۵ میلی-متر تهیه و با ارتفاع ۴ میلی-متر برش داده شدند، از تیتانیوم خالص گرید ۲ به عنوان لایه میانی اتصال استفاده شد. نمونه‌های برش داده شده تا سنباده ۱۲۰۰ سنباده زنی شده و درون استون به مدت ۱۰ دقیقه تحت فرایند آلتراسونیک قرار گرفتند، این نمونه‌ها به صورتی که در شکل ۱ نشان داده شده است در فیکسچر قرار داده شد. فشار ثابت ۵ MPa با استفاده از یک گشتاورسنج بر روی نمونه‌ها اعمال گردید.



شکل ۱- نحوه قرارگیری نمونه‌ها در فیکسچر حین انجام اتصال



شکل ۲- طرحواره فیکسچر ارزیابی استحکام برشی اتصال

انجام فرایند، نمونه‌ی تهیه شده در دمای ۹۰۰°C اتصال بهتری نسبت به بقیه نمونه‌ها داشته است. تصاویر تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ نوری در شکل ۳ آورده شده است، این تصاویر مربوط به نمونه‌هایی است که اتصال مناسب جهت آماده‌سازی را داشته‌اند (نمونه 900T1H، 1000T1H، 950T1H و 1000T2H).

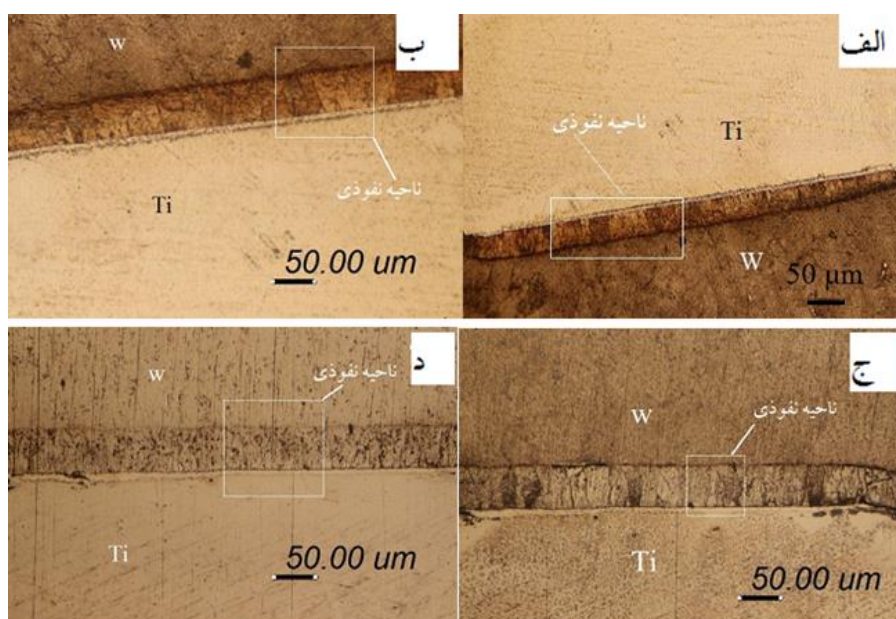
### نتایج و بحث

#### نحوه اتصال و بررسی ریزساختاری و فازی

در جدول ۱ کد اختصاصی نمونه‌ها و نحوه اتصال آن‌ها آورده شده است که در آن مشاهده می‌شود تا دمای ۹۰۰°C هیچ‌گونه اتصالی انجام نشده است و با افزایش دما اتصال بهبود یافته است. با در نظر گرفتن زمان ۲ ساعت برای

جدول ۱- شرایط انجام اتصال و کد اختصاص داده شده به نمونه‌ها

نحوه اتصال	زمان اتصال	دمای اتصال	کد نمونه
عدم اتصال	۱ ساعت	۸۰۰°C	<b>800T1H</b>
عدم اتصال	۱ ساعت	۸۵۰°C	<b>850T1H</b>
اتصال قوی	۱ ساعت	۹۰۰°C	<b><u>900T1H</u></b>
اتصال قوی	۱ ساعت	۹۵۰°C	<b><u>950T1H</u></b>
اتصال قوی	۱ ساعت	۱۰۰۰°C	<b><u>1000T1H</u></b>
عدم اتصال	۲ ساعت	۸۰۰°C	<b>800T2H</b>
عدم اتصال	۲ ساعت	۸۵۰°C	<b>850T2H</b>
اتصال قوی	۲ ساعت	۹۰۰°C	<b><u>900T2H</u></b>
اتصال بسیار ضعیف	۲ ساعت	۹۵۰°C	<b>950T2H</b>
اتصال بسیار ضعیف	۲ ساعت	۱۰۰۰°C	<b>1000T2H</b>

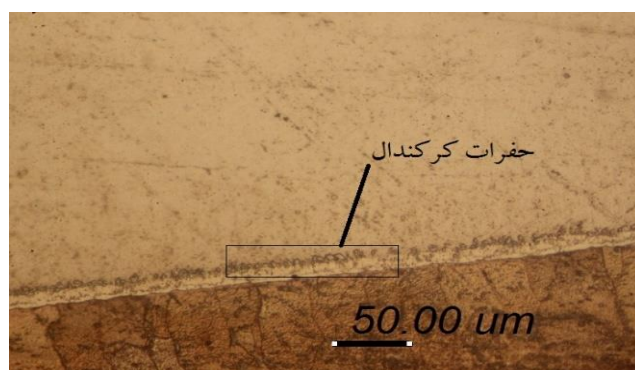


شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه اتصال داده شده در: الف) دمای ۹۰۰ °C به مدت ۱ ساعت (900T1H)، ب) دمای ۹۵۰ °C به مدت ۱ ساعت (950T1H)، ج) دمای ۱۰۰۰ °C به مدت ۱ ساعت (1000T1H) و د) دمای ۹۰۰ °C به مدت ۲ ساعت (900T2H)، در بزرگمایی ۱۰۰۰X

در شکل ۴ حفراتی در قسمت تیتانیومی اتصال مشاهده می‌شود که می‌توان به عنوان حفرات کرکندال تلقی شود، بر اساس اثر کرکندال فلزاتی که نقطه ذوب کمتری دارند، ضریب نفوذ بیشتری داشته و بالعکس، بر این اساس فلزی که نقطه ذوب کمتری دارد به داخل فلزی که نقطه ذوب بالاتری دارد نفوذ کرده و به دلیل این نفوذ، جاهای خالی در سمت فلز با نقطه ذوب کم‌تر افزایش یافته و این جاهای خالی تشکیل حفره می‌دهند که به این حفرات، حفرات کرکندال گفته می‌شود. وجود این حفرات در تیتانیوم موید نفوذ تیتانیوم در تنگستن به علت نقطه ذوب پایین‌تر تیتانیوم نسبت به تنگستن است. در بررسی ثابت‌قدم و همکارانش نیز حضور حفرات کرکندال مشاهده شده است [۵]. از آنجایی که اختلاف نقطه ذوب فولاد و تیتانیوم زیاد نیست، در چنین فصل مشترک‌هایی حفرات کرکندال تشکیل نمی‌شوند. اختلاف زیاد نقطه ذوب تیتانیوم و تنگستن عامل اصلی تشکیل حفرات کرکندال در فصل مشترک آن دو شده است.

در دمای ۸۰۰ °C به دلیل پایین بودن دما، نفوذ به خوبی انجام نشده و اتصال ایجاد نشده است. در دمای ۱۰۰۰ °C و ۹۵۰ °C و زمان ۲ ساعت احتمال می‌رود به دلیل افزایش زمان نفوذ به دلیل افزایش ترکیبات بین‌فلزی و ترد شدن فصل مشترک، اتصال به خوبی ایجاد نشده است (این آزمون‌ها سه بار تکرار شد و در هیچ‌کدام از این سه مرتبه اتصالی رخ نداد). اتصال و نفوذ مناسب در اتصال تنگستن-تیتانیوم به وضوح قابل مشاهده است، در صورتی که این ناحیه نفوذی در سمت فولاد-تیتانیوم، مشاهده نشد.

همان‌گونه که در تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری مشخص شده است، با افزایش دما، طول ناحیه نفوذی افزایش یافته که علت آن افزایش نفوذ اتم‌ها می‌باشد. طبق سایر تحقیقاتی که تاکنون در زمینه جوشکاری نفوذی انجام شده است با افزایش دمای فرایند جوشکاری طول ناحیه نفوذی افزایش یافته است [۱].



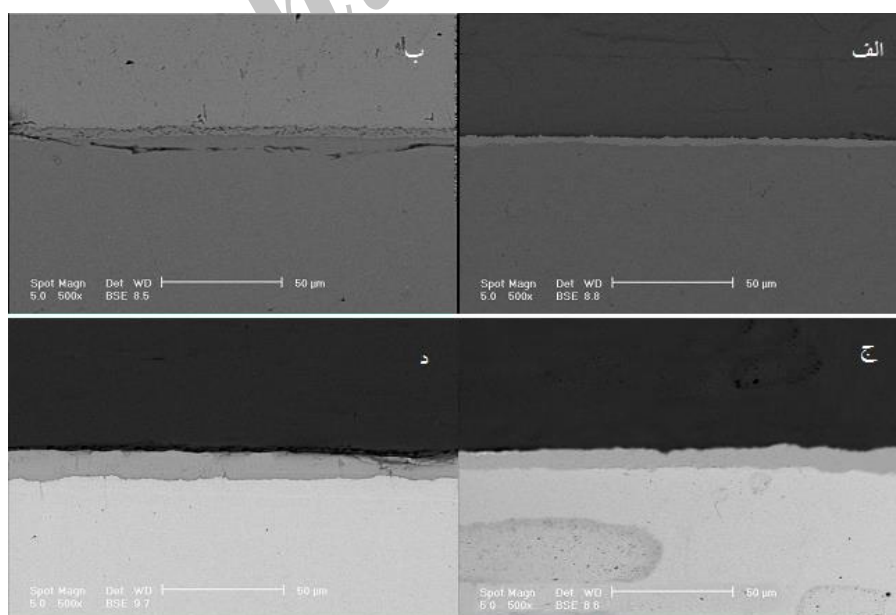
شکل ۴- حفرات کرکندال تشکیل شده در لایه تیتانیومی بزرگنمایی  $1000\times$ .

ایکس (EDS) در سطح اتصال تنگستن- تیتانیوم نمونه‌های 1000T1H انجام شد. براساس نمودار حاصل از این آزمون که در شکل ۶-الف نشان داده شده است، تیتانیوم در تنگستن نفوذ کرده در صورتی که در محل اتصال فولاد- تیتانیوم، نفوذ تیتانیوم بسیار جزئی بوده است (شکل ۶-ب). تشکیل محلول جامد هنگامی میسر است که اختلاف شعاع اتمی دو عنصر کمتر از ۱۵٪ باشد و اگر اختلاف شعاع اتمی بیش از ۱۵٪ باشد، تشکیل محلول جامد بسیار محدود است [۷] و احتمال تشکیل ترکیبات بین فلزی و در نتیجه کاهش استحکام اتصال افزایش خواهد یافت [۸].

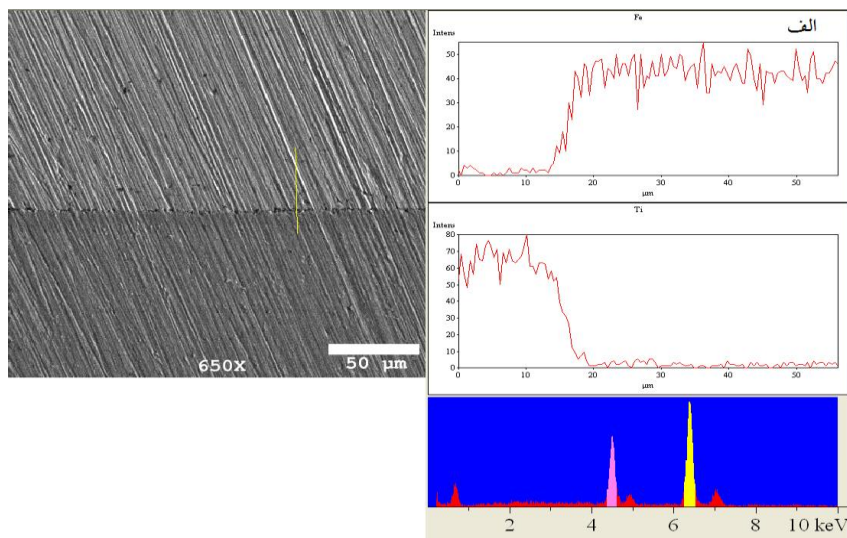
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار نمونه‌های اتصال یافته در شکل ۵ نشان داده شده است، مناطق روشن تنگستن، مناطق تیره تیتانیوم و مناطق خاکستری رنگ منطقه نفوذی تیتانیوم در تنگستن است.

این تصاویر موید نفوذ تیتانیوم در تنگستن است و همان‌طور که در تصاویر متالوگرافی نیز مشاهده شد منطقه نفوذی با افزایش دما افزایش یافته است. نتایج تحقیقات یانگ و همکارانش نیز بیان کننده نفوذ تیتانیوم در تنگستن می‌باشد [۶].

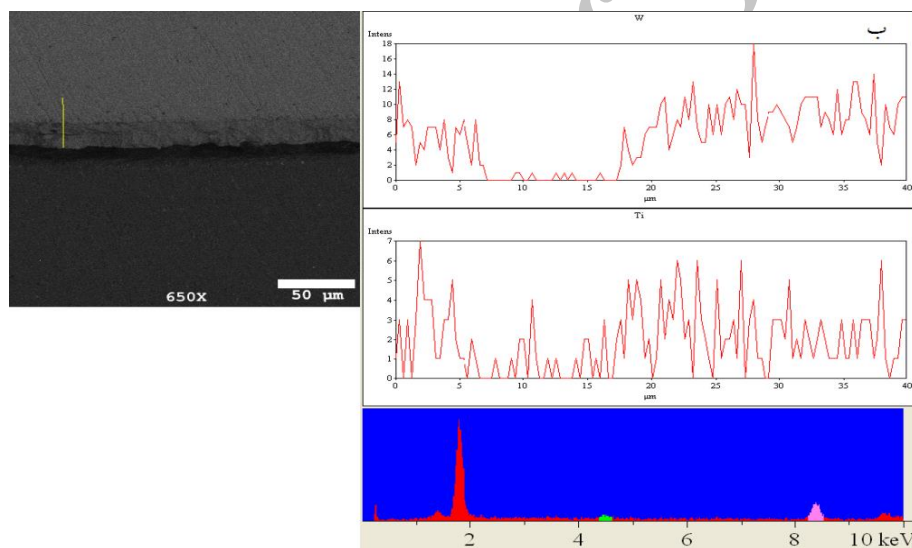
به منظور تایید نفوذ تیتانیوم در تنگستن و عدم نفوذ تیتانیوم در فولاد، آزمون طیف‌سنجی تفکیک انرژی پرتوی



شکل ۵- تصاویر SEM نمونه اتصال داده شده در: الف) دمای  $900^\circ\text{C}$  به مدت ۱ ساعت (900T1H)، ب) دمای  $950^\circ\text{C}$  به مدت ۱ ساعت (950T1H)، ج) دمای  $1000^\circ\text{C}$  به مدت ۱ ساعت (1000T1H) و د) دمای  $900^\circ\text{C}$  به مدت ۲ ساعت (900T2H)، در مرز اتصال تنگستن- تیتانیوم



شکل ۶- الف- نتایج آزمون EDS نمونه اتصال داده شده در دمای ۱۰۰۰ به مدت ۱ ساعت (1000T1H) در مرز اتصال فولاد- تیتانیوم



شکل ۶- ب- نتایج آزمون EDS نمونه اتصال داده شده در دمای ۱۰۰۰ به مدت ۱ ساعت (1000T1H) در مرز اتصال تنگستن- تیتانیوم

نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس نمونه‌های جوشکاری نفوذی شده در دماها و زمان‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در دمای ۹۰۰ °C و دمای ۱ ساعت فازهای موجود عبارتند از  $Ti-\alpha$ ،  $Fe$ ،  $FeTi$ ،  $Fe_2Ti$  و  $W$ ؛ در دمای ۹۰۰°C و زمان ۲ ساعت، فازهای موجود همان فازهای موجود در دمای ۹۰۰°C و زمان ۱ ساعت بوده با این تفاوت که شدت پیک ترکیبات بین فلزی افزایش یافته است، به این معنا که با افزایش زمان فرایند اتصال، میزان فازهای بین فلزی افزایش یافته

شعاع اتمی تیتانیوم ۱۷۶ pm، آهن ۱۲۶ pm و تنگستن ۲۱۰ pm است (اختلاف شعاع اتمی تنگستن- تیتانیوم ۱۶٪ و تیتانیوم- آهن ۲۸٪)؛ با توجه به شرایط تشکیل محلول جامد و با توجه به اختلاف بیش‌تر شعاع اتمی تیتانیوم و آهن احتمال تشکیل محلول جامد تیتانیوم در آهن بسیار ناچیز بوده و بیش‌تر به صورت ترکیبات استوکیومتری (ترکیبات بین فلزی) تشکیل می‌شوند.

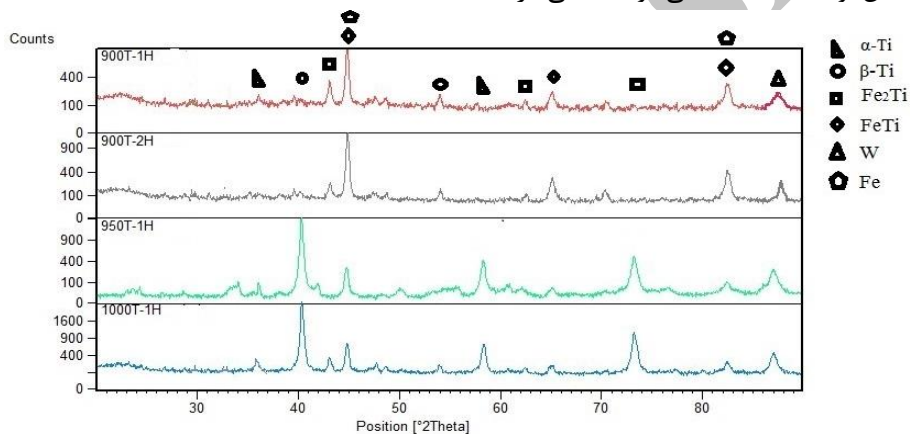
فصل مشترک تیتانیوم- فولاد، در همه نمونه‌ها نسبت به بقیه قسمت‌های نمونه دارای مقدار بیشینه است که علت آن حضور ترکیب بین‌فلزی FeTi در فصل مشترک است؛ در نمونه 1000T1H سختی در فصل مشترک بیش‌تر از بقیه نمونه‌هاست که علت آن حضور Fe<sub>2</sub>Ti علاوه بر FeTi در فصل مشترک است. در ناحیه نفوذی نیز به علت نفوذ تیتانیوم در تنگستن و تشکیل محلول جامد سختی افزایش یافته است. سختی در تنگستن و فولاد با افزایش دما به علت رشد دانه کاهش یافته است. آتاسوی و همکارانش [۹] نیز بیش‌ترین سختی را در فصل مشترک فولاد- تیتانیوم گزارش کرده و علت آن را تشکیل ترکیبات بین‌فلزی دانسته‌اند.

است، با افزایش دمای فرایند به ۹۵۰° C، استحاله آلوتروپیک α به β رخ داده و شدت پیک ترکیب بین فلزی Fe<sub>2</sub>Ti نیز افزایش یافته است. همچنین شدت پیک فاز β نیز افزایش یافته است. در دمای ۱۰۰۰°C نیز فازهای موجود مانند نمونه ۹۵۰°C بوده با این تفاوت که شدت پیک فازها افزایش یافته است، به این معنا که با افزایش دمای فرایند اتصال نیز، میزان فازهای بین فلزی افزایش یافته است. یانگ نیز فازهای بیان شده را در اتصال فولاد- تیتانیوم- تنگستن گزارش کرده است [۶].

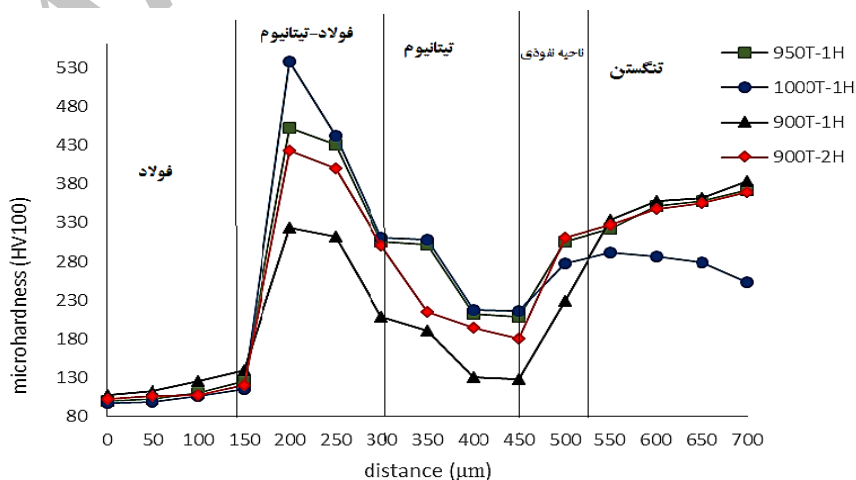
### خواص مکانیکی

#### ریزسختی سنجی

پروفیل ریزسختی تهیه‌شده از نمونه‌ها در شکل ۸ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سختی در



شکل ۷- الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های جوشکاری نفوذی شده در دماها و زمان‌های مختلف



شکل ۸- پروفیل میکروسختی نمونه‌های اتصال یافته در دماها و زمان‌های مختلف



### آزمون استحکام برشی

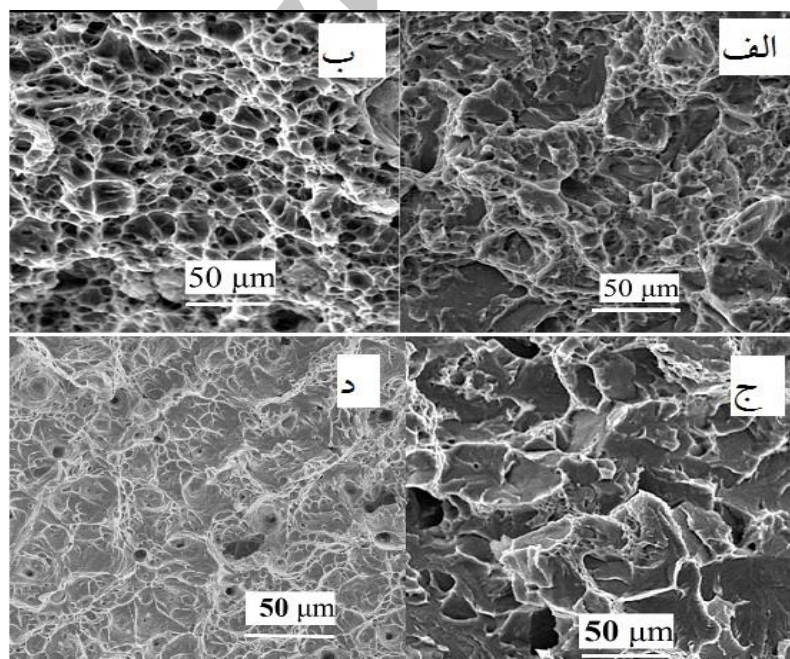
استحکام برشی نتیجه شده از این آزمون در جدول ۲ آورده شده است. در این بررسی همان گونه که انتظار می‌رفت، نمونه 950T1H دارای بیشترین و نمونه 1000T1H کمترین میزان استحکام برشی را داشته است. از سوی دیگر شکست در همه نمونه‌ها از سمت اتصال فولاد- تیتانیوم رخ داده است، چون نفوذی در این دو ماده رخ نداده و ترکیبات ترد بین فلزی در این ناحیه تشکیل شده است.

سطح شکست نمونه‌ها (اتصال فولاد- تیتانیوم) در شکل ۹ آورده شده است. با توجه به سطوح شکست، نمونه 900T1H شکست ترد، نمونه 950T1H سطحی نرم، نمونه 1000T1H شکستی ترد و نمونه 900T2H شکست ترکیبی از نرم و ترد داشته است. حضور دیمپل در سطح شکست

بیانگر شکست نرم و وجود مناطق رخ‌برگی در سطوح شکست موید شکست کلیواژ است. سطح شکستی که ناشی از شکست گسیختگی یا برش است، دیمپل‌ها حالتی کشیده دارد. مشخصه این نوع شکست این است که دیمپل‌ها کشیده شده و در جایی که دیمپل بعدی باز می‌شود، بسته می‌شود [۱۰]. در نمونه 950H1T، دیمپل‌ها حالتی تقریباً کشیده داشته که بیانگر حالت برشی شکست است. شکست کلیواژ، شکستی کم انرژی بوده که در طول صفحات با اندیس کم گسترش می‌یابد که به آن‌ها صفحات کلیواژ گفته می‌شود. به هر حال آلیاژهای مهندسی پلی- کریستال بوده و شامل مرزدانه، ناخالصی، نابجایی و دیگر ناپیوستگی‌ها هستند که توسعه شکست کلیواژ را تحت تاثیر قرار می‌دهند [۱۰]. می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش دما و زمان اتصال، به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی Fe<sub>2</sub>Ti علاوه بر FeTi، شکست ترد رخ داده است.

جدول ۲- استحکام برشی نمونه‌های مختلف

کد نمونه	900T1H	950T1H	1000T1H	900T2H
استحکام برشی (MPa)	۷۳±۰٫۵	۱۶۲±۲	۶۶±۴	۷۱±۱



شکل ۹- تصاویر SEM سطح شکست اتصال در نمونه اتصال داده شده در: الف) دمای ۹۰۰ °C به مدت ۱ ساعت (900T1H)، ب) دمای ۹۵۰ °C به مدت ۱ ساعت (950T1H)، ج) دمای ۱۰۰۰ °C به مدت ۱ ساعت (900T2H) و د) دمای ۹۰۰ °C به مدت ۲ ساعت (1000T1H)

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق فولاد ساده کربنی و تنگستن خالص تجاری به روش نفوذی به یکدیگر اتصال داده شده‌اند و تاثیر میان لایه تیتانیومی، دما و زمان اتصال بر ویژگی‌های مکانیکی و ساختاری اتصال بررسی شد.

- ۱- بر اساس بررسی‌های ریزساختاری، با افزایش دما و زمان میزان منطقه نفوذی افزایش یافته است.
- ۲- فازها و ترکیبات تشکیل شده در نمونه‌های اتصال یافته تیتانیوم آلفا و بتا، FeTi و Fe<sub>2</sub>Ti بودند که با افزایش دما و یا زمان فرایند اتصال، میزان این ترکیبات بین فلزی افزایش یافته است.
- ۳- سختی در فصل مشترک فولاد- تیتانیوم به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی بیش‌ترین میزان بوده و نمونه 1000T1H به دلیل میزان بیش‌تر این ترکیبات دارای بیشینه سختی است. در حالی که استحکام برشی نمونه 950T1H مقدار بیشینه بوده است.
- ۴- در این بررسی برای اتصال فولاد- تیتانیوم- تنگستن دمای ۹۵۰ و زمان ۱ ساعت پارامتر بهینه بوده است.

### References:

- 1- S.Kundu, M. Ghosh, S. Chatterjee, "Diffusion bonding of commercially pure titanium and 17-4 precipitation hardening stainless steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 428, pp. 18–23, 2006.
- 2- W.S.Liu, Q.S. Cai, Y.Z. Ma, Y.Y. Wang, H.Y. Liu, D.X. Li, "Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded W / steel joint using V / Ni composite interlayer", *Materials Characterization*, Vol. 86, pp. 212-220, 2013.
- 3- W.W.Basuki, J. Aktaa, "Investigation of tungsten / EUROFER97 diffusion bonding using Nb interlayer", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 86, pp. 2585–2588, 2011.
- 4- Z.Zhong, T. Hinoki, A. Kohyama,

با افزایش دمای اتصال، تغییرشکل پلاستیک و نفوذ درهم بهبود پیدا می‌کند؛ اما استحکام برشی کاهش می‌یابد. تأثیر مثبت نفوذ درهم با رشد لایه ترد بین فلزی خنثی می‌شود و به نظر می‌رسد که لایه ترد بین فلزی عامل اصلی در تعیین استحکام برشی اتصال است. به علاوه حفرات کرکندال که به دلیل جابجایی نامتعادل اتم‌های تیتانیوم و آهن در فصل مشترک شکل گرفته است نیز در استحکام تأثیر می‌گذارد. کاندا و همکارانش [۱] نیز دریافته‌اند با افزایش دما و زمان فرایند جوشکاری نفوذی، به دلیل افزایش ترکیبات بین فلزی و ترد شدن، استحکام اتصال کاهش خواهد یافت. هرچند که با افزایش دمای فرایند جوشکاری، میزان نفوذ اجزا در یکدیگر افزایش می‌یابد؛ اما انتخاب کم‌ترین دمای فرایند ممکن، از این جهت که مانع رشد دانه و اثرات منفی آن خواهد شد، نسبت به دمای فرایند بالا اولویت دارد [۱۱]. بنابراین انتظار می‌رود در این فرایند جوشکاری، با افزایش دمای فرایند، ابتدا استحکام اتصال افزایش (به دلیل افزایش میزان نفوذ)، سپس با افزایش بیش‌تر دما، کاهش یابد (به دلایلی مانند رشد دانه و یا افزایش میزان ترکیبات بین فلزی) [۱۲].

"Effect of holding time on the microstructure and strength of tungsten / ferritic steel joints diffusion bonded with a nickel interlayer", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 518, pp. 167–173, 2009.

5- H.Sabetghadam, A.Z. Hanzaki, A. Araee, "Diffusion bonding of 410 stainless steel to copper using a nickel interlayer Shear strength", *Materials Characterization*, Vol. 61, pp. 626–634, 2010.

6- Z.Yang, Y. Shen, Z. Wang, J. Cheng "Tungsten / steel diffusion bonding using Cu / W – Ni / Ni multi-interlayer", *Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 24, pp. 2554–2558, 2014.

۷- رزاقیان. ا.، *خواص فیزیکی مواد*، انتشارات دانشگاه بین المللی امام خمینی، ۱۳۹۰.

۸- سبکتین ریزی. م.، رضوی. س.غ.، *مناجاتی زاده. ح.*، اتصال نوردی تیتانیوم به فولاد با استفاده از لایه میانی نیکل، *مجله مواد نوین*، جلد ۳، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۱.

9- E.Atasoy, N. Kahraman, "Diffusion bonding of commercially pure titanium to low carbon steel using a silver interlayer", *Materials characterization*, Vol. 59(10), pp. 1481-1490, 2008.

10- V. Kerlins, *Modes of Fracture*,

*Fractography*, ASM Hand book, Vol. 12, 1991.

11- W.W.Basuki, J.Aktaa, "Process optimization for diffusion bonding of tungsten with EUROFER97 using a vanadium interlayer", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 459, pp. 217-224, 2015.

12- Z.Zhong, H.cheaJung, T.Hinokib, A.Kohyama, "Effect of joining temperature on the microstructure and strength of tungsten/ferritic steel joints diffusion bonded with a nickel interlayer", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 1805-1810, 2010.

Archive of SID