








# Effect of diffusion bonding temperature on microstructure properties of Zr/Ti interlayer in the diffusion bonded joints of Zr702 to A516 steel



A. Pourjafar<sup>1</sup>, R. Dehmlaei<sup>1,2</sup>, S.R. Alavi Zaree<sup>1</sup>, Kh. Ranjbar<sup>1</sup>,  
M. Tavakoli Shoushtari<sup>1</sup>

1- Department of Materials Science & Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Steel Research Center, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khouzestan Oxin Steel Co.

Received 10 June 2022 ; Accepted 11 October 2022

## Abstract

In this study, the effect of temperature on the microstructure and reactive layer at the interface between the Ti interlayer and the base metal related to the diffusion bonding of Zr702 to A516 low alloy steel was investigated. The joining was done using the spark plasma sintering technique at temperatures of 900, 950 and 1000°C for 30 minutes. Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) equipped with EDS analysis was used to investigate the microstructure of the interfaces in various joints. Investigations showed that at all temperatures, with the diffusion of atoms and the formation of a reactive layer between the Ti interlayer and Zr702, no intermetallic phases, cracks, porosity and discontinuities were formed at their interfaces. Three solid solution phases are detected in the bonding interface:  $(\alpha + \beta)_{(Zr,Ti)}$ ,  $\alpha_{(Ti,Zr)}$  and  $\beta_{(Ti,Zr)}$ . It was found that increasing the bonding temperature did not cause the formation of new phases and compounds in the interface and only increased the thickness of the reaction layer. The measurement of the thickness of the reactive layer showed that the maximum and minimum amounts of diffusion were 84 microns at 1000 °C and 64 microns at 900 °C respectively.

**Keywords:** Diffusion bonding; Interlayer, Interface, reaction layer, Zr702, SPDB Technique.



Corresponding Author: [dehmlaei@scu.ac.ir](mailto:dehmlaei@scu.ac.ir)



## تاثر دما بر رىزساختار و لايه واكنشى فصل مشترك Zr/Ti در اتصال نفوذى Zr702 به فولاد A516

علمى پورجعفر<sup>1</sup>، رضادهملاى<sup>1,2\*</sup>، سىدرضا علوى زارع<sup>1</sup>، خليل رنجبر<sup>1</sup>، محمدرضا توكلى شوشترى<sup>1</sup>

1- گروه مهندسى مواد، دانشكده مهندسى، دانشگاه شهىد چمران اهواز، اهواز، ايران

2- مركز تحقيقات فولاد، دانشگاه شهىد چمران اهواز، شركت فولاد اكسپن خوزستان

درىافت مقاله: 1401/03/20؛ پذىرش مقاله: 1401/07/19

### چكیده

در اين پژوهش تاثر دما بر رىزساختار و لايه واكنشى در فصل مشترك لايه ميانى Ti و فلز پايه مربوط به اتصال نفوذى آلياژ زىركونىوم 702 به فولاد كم آلياژ A516 بررسى شد. اتصال با استفاده از تكنىك اتصال نفوذى پلاسمائى جرقه زن در دماهاى 900، 950 و 1000 درجه سانتى گراد و مدت زمان 30 دقيقه انجام گرديد. به منظور بررسى رىزساختار فصل مشترك اتصال از مىكروسكوپ نورى و الكترونى روبشى گسىل ميدانى (FESEM) مجهز به آناليز EDS استفاده شد. بررسى هاى مىكروسكوپى نشان داد كه در همه دماها با وجود نفوذ متقابل اتم ها و تشكيل لايه واكنشى مناسب بين لايه ميانى تىتانىوم و فلز پايه زىركونىوم، هىچ گونه فاز بين فلزى، ترك، حفره و ناپىوستگى در فصل مشترك آن ها تشكيل نگرديده است. در فصل مشترك اتصال سه فاز محلول جامد  $(\alpha+\beta)_{(Zr,Ti)}$  و  $\beta_{(Ti,Zr)}$  و  $\alpha_{(Ti,Zr)}$  شناسائى شدند. مشخص گرديد كه با افزائش دماى اتصال، فازها و تركيبات جديده در فصل مشترك تشكيل نگرديده ولى ضخامت لايه واكنشى افزائش يافته است. اندازه گىرى ضخامت لايه واكنشى نشان داد كه بىشتريين ميزان نفوذ معادل 84 مىكرون در دماى 1000 °C و كمترين ميزان نفوذ معادل 64 مىكرون در دماى 900 °C صورت گرفته است.

كلمات كلدى: اتصال نفوذى، لايه ميانى، فصل مشترك، لايه واكنشى Zr702، تكنىك SPDB.

\* نويسنده مسؤل، پست الكترونىكى: [dehmlaei@scu.ac.ir](mailto:dehmlaei@scu.ac.ir)

### 1- مقدمه

خوردگى حفره اى و خوردگى شيارى مشخص مى شود. اين آلياژ يكى از محبوب ترين مواد سازه اى است كه با خواصى نظىر مقاومت عالى در برابر خوردگى، خواص مكانىكى عالى و قابليت تراشكارى خوب به طور گسترده اى در زمينه هاى انرژى

زىركونىوم 702 حالت تجارى زىركونىوم است كه با عنوان زىركونىوم خالص تجارى يا غير آلياژى نىز شناخته مى شود و با اىمنى در برابر ترك خوردگى تنشى و مقاومت زياد در برابر

هسته‌ای، پتروشیمی، پزشکی و سازه‌های مورد استفاده در محیط‌های با خوردگی بسیار شدید مانند برج‌ها، راکتورها، مبدل‌های حرارتی، بخارسازها، پمپ‌ها، سیستم‌های لوله‌کشی، شیرآلات و همزن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [1-3].

ریزساختار زیرکونیوم 702 در دمای اتاق از دانه‌های هم‌محور با اندازه دانه متفاوت و ذرات فاز دوم پراکنده در داخل دانه‌ها و در امتداد مرز دانه‌ها تشکیل شده است [4]. زیرکونیوم خالص در دمای اتاق دارای ریزساختار HCP یا  $\alpha$ -Zr است و در دمای  $865^\circ\text{C}$  ریزساختار حاوی  $\alpha$ -Zr(HCP) تبدیل به ریزساختار  $\beta$ -Zr با ساختار BCC می‌شود [5]. حضور مقدار اندکی نئوبیم می‌تواند موجب پایداری فاز  $\beta$  در دمای اتاق و تثبیت ریزساختار دو فازی ( $\alpha+\beta$ ) شود که دما، زمان و نرخ سرمایش نیز بر میزان پایداری فاز  $\beta$  موثر است [6].

جوشکاری آلیاژهای زیرکونیوم، با وجود جوش‌پذیری خوب، با مشکلاتی همراه است. در روش جوشکاری قوس تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی فازهای ترد و شکننده به دلیل واکنش بین زیرکونیوم و عناصر هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن ایجاد می‌شوند که می‌تواند خواص پلاستیسیته و استحکام اتصال حاصل را به شدت ضعیف کند [7-8]. علاوه بر این، دانه‌های منطقه ذوب و منطقه تحت تأثیر گرما، به دلیل هدایت حرارتی ضعیف آلیاژ زیرکونیوم، درشت می‌شوند که می‌تواند باعث آسیب به عملکرد ناحیه اتصال گردد [2]. بررسی‌ها نشان داده است که احتمال پیچش در جوشکاری قطعات آلیاژهای زیرکونیوم سه برابر فولادها بوده و عیوبی نظیر تشکیل حفره و احتمال آلودگی فلزجوش با اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن از عیوب مطرح در جوشکاری این قطعات است [9].

فولادهای استحکام بالای کم‌آلیاژ یا فولادهای کم‌آلیاژ با هدف دستیابی به خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی بهتر تولید می‌شوند. این فولادها جوش‌پذیری، شکل‌پذیری، استحکام، انعطاف‌پذیری و مقاومت به خوردگی اتمسفری مناسبی نسبت به فولادهای معمولی را از خود نشان می‌دهند. از این فولادها به‌طور گسترده در لوله‌های انتقال نفت و گاز، ماشین‌های ساخت و شکل‌دهی، تجهیزات صنعتی، مخازن ذخیره،

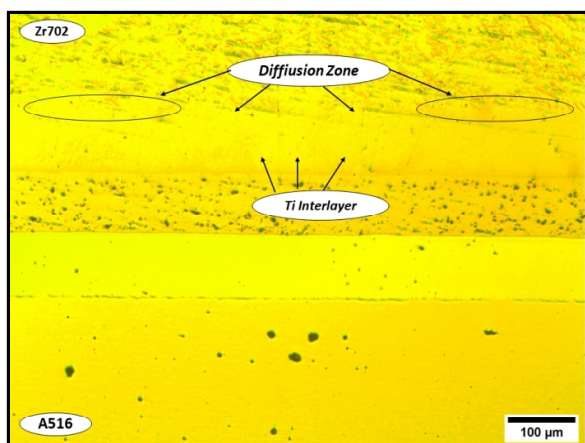
ماشین‌آلات معدنی و زبلی و سازه‌های صنعتی استفاده می‌شود [10]. ریزساختار فولادهای استحکام بالای کم‌آلیاژ براساس عملیات حرارتی و روش تولید آن‌ها، شامل فریت، پرلیت، مقدار اندکی کاربیدها، کاربونیتریدها و نیتریدها است [11].

برای استفاده از خواص مناسب آلیاژهای مختلف اتصال آن‌ها در بسیاری از موارد ضروری است. جوشکاری یکی از روش‌های مناسب و پرکاربرد برای اتصالات غیرمشابه است. بررسی‌ها نشان داده است که در خیلی از موارد به دلیل تفاوت زیاد خواص دو آلیاژ غیرمشابه، جوشکاری ذوبی آن‌ها با مشکلات فراوانی روبرو است. لذا به نظر می‌رسد که روش‌های جوشکاری حالت جامد نظیر جوشکاری نفوذی می‌تواند فرایند مناسبی جهت اتصالات غیرمشابه در چنین شرایطی باشد [12-15]. در بسیاری از موارد به دلیل تفاوت زیاد خواص فیزیکی، مکانیکی و ترکیب شیمیایی مواد مختلف، اتصال آن‌ها در حالت جامد نظیر اتصالات نفوذی نیز با چالش‌های بسیاری روبرو خواهد بود. در اتصالات نفوذی به‌ویژه در حالت غیرمشابه استفاده از لایه میانی مناسب (تکی و یا چندتایی) و کنترل پارامترهای فرایند نظیر دما، زمان و فشار اتصال دارای نقش تعیین‌کننده‌ای است [16-18]. در این بین لایه میانی دارای نقش بسیار اساسی است و استفاده از آن موجب افزایش سطح تماس موثر، کاهش تنش‌های پسماند و ممانعت از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی نامطلوب در فصل مشترک اتصال می‌شود [19-21]. اتصال نفوذی شدیداً تابع دما است و با افزایش دما، عمق نفوذ اتم‌ها و ضخامت لایه واکنشی افزایش می‌یابد [22-23]. با این وجود، افزایش دما در اتصالات نفوذی علاوه بر تشدید تنش‌های حرارتی در فصل مشترک و کاهش خواص اتصال، در بسیاری از موارد باعث تشویق تشکیل فازها و ترکیبات بین‌فلزی مضر می‌گردد [13، 24 - 25]. از طرفی کافی نبودن دمای اتصال باعث نفوذ ناکافی و عدم تشکیل لایه واکنشی مناسب می‌گردد [26]. از این‌رو کنترل و انتخاب صحیح درجه حرارت اتصال در فرایند نفوذی از اهمیت ویژه برخوردار است. در این پژوهش اتصال نفوذی دو آلیاژ Zr702 و فولاد A516 با تکنیک اتصال نفوذی پلاسمای جرقه‌ای

فصل مشترک زیرکونیوم 702 با لایه میانی تیتانیوم در دماهای مختلف اتصال با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختاری بیشتر و آنالیز فازها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و FESEM مجهز به سیستم آنالیز EDS انجام گردید. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی با استفاده از نرم‌افزار اندازه‌گیری مقیاس Digimizer بررسی شد و عمق نفوذ اتم‌ها و ضخامت لایه‌های واکنشی در شرایط مختلف اتصال اندازه‌گیری گردید.

### 3- نتایج و بحث

شکل (1) تصویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک اتصال در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  و زمان 30 دقیقه را نشان می‌دهد. شکل به وضوح نشان می‌دهد که نفوذ به‌خوبی انجام شده است و در سرتاسر فصل مشترک Zr/Ti هیچگونه ترک، حفره و ناپیوستگی وجود ندارد. در اثر نفوذ متقابل اتم‌های Zr و Ti در یکدیگر و اختلاف در میزان نفوذ آن‌ها، نواحی واکنشی مختلفی در فصل مشترک تشکیل شده است.



شکل 1- تصویر میکروسکوپ نوری فصل مشترک اتصال در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  و زمان 30 دقیقه

دیاگرام فازي Zr-Ti [31] نشان می‌دهد که عناصر Zr و Ti دارای حلالت خوبی در یکدیگر در تمامی دماها هستند و ضمن تشکیل محلول جامد، هیچگونه ترکیبات بین‌فلزی و فازهای میانی در فصل مشترک آن‌ها تشکیل نمی‌شود. عدم تشکیل ترکیبات بین‌فلزی و ناپیوستگی در فصل مشترک می‌تواند به دلیل

در دماهای مختلف و با استفاده از لایه میانی تیتانیوم انجام گردید. فصل مشترک اتصال بین لایه میانی و فلز پایه Zr702 در دماهای مختلف با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روشی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

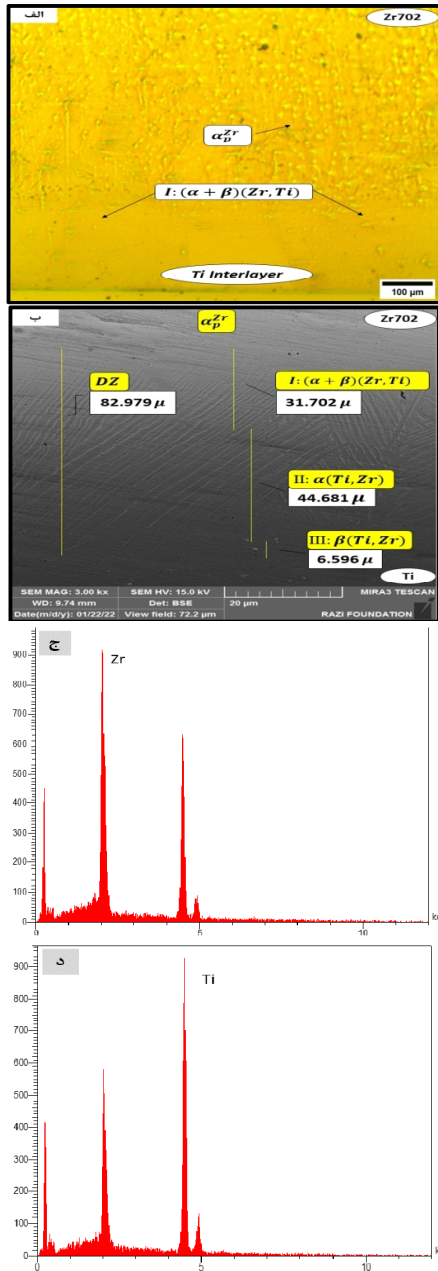
### 2- روش تحقیق

در این پژوهش از آلیاژ زیرکونیوم 702 و فولاد A516 با مقطع دایره‌ای با قطر  $23/5$  میلی‌متر و به ترتیب با ضخامت‌های  $2/8$  و  $3/1$  میلی‌متر به عنوان فلز پایه استفاده گردید. جدول (1) ترکیب شیمیایی فلزات پایه استفاده‌شده را نشان می‌دهد. از فویل تیتانیوم با خلوص  $99/8$  درصد و ضخامت  $100\mu\text{m}$  و هم‌قطر با مواد پایه به عنوان لایه میانی استفاده شد. فلزات پایه و لایه میانی تیتانیوم تا سناده 5000 سناده‌زنی شدند و توسط نمد مخصوص و با استفاده از پودر آلومینای  $0/05$  میکرون پولیش گردیدند. سپس سطوح نمونه‌ها با استون کاملاً تمیز و خشک گردید. برای انجام جوشکاری از روش اتصال نفوذی پلاسمای جرقه‌ای (SPDB) استفاده شد. بدین منظور فلزات پایه و لایه میانی به ترتیب Zr702/Ti/A516 با دقت روی هم قرار گرفته و در دستگاه SPS قرار داده شدند. اتصال نمونه‌ها در دماهای  $900^{\circ}\text{C}$ ،  $950^{\circ}\text{C}$  و  $1000^{\circ}\text{C}$  و زمان 30 دقیقه، تحت خلا  $5 \times 10^{-2}$  میلی‌بار انجام گردید.

روش SPDB روشی مبتنی بر تکنیک زینتر کردن پلاسمای جرقه‌ای (SPS) است که باعث افزایش نفوذ اتم‌ها و بهبود شرایط تغییر شکل پلاستیک می‌شود. برتری اصلی این روش حرارت‌دهی با نرخ بالا در فصل مشترک اتصال است که آن را نسبت به روش‌های پیشین برجسته می‌کند [27]. از مزایای این روش می‌توان به کاهش زمان اتصال نسبت به سایر روش‌ها، نرخ حرارت‌دهی بالاتر، سهولت استفاده، حرارت موضعی بالا در محل اتصال نمونه‌ها و عدم اکسایش سطح نمونه‌ها به علت استفاده از محیط خنثی یا خلا اشاره نمود [28]. به منظور متالوگرافی و مطالعات ریزساختاری، نمونه‌های مناسبی از سطح مقطع اتصالات با وایرکات آماده گردید. سطح مقطع نمونه‌ها با استفاده از سناده 120 تا 5000 سناده‌زنی شدند، سپس با نمد مخصوص و پودر آلومینای  $0/05$  میکرون پولیش گردیدند.

جدول 1- ترکیب شیمیایی آلیاژ زیرکونیوم 702 و فولاد کم آلیاژ A516 [35-36] (wt %)

Alloy	Zr+Hf (Min)	Hf (Max)	C	Nb	Fe	Cr/Ni/Cu	Fe+Cr Max	Mn	O (Max)	Si	P/S/Ti
Zr702	۹۹/۲	۴/۵	-	-	-	-	۰/۲	-	۰/۱۶	-	-
A516	-	-	۰/۱ - ۰/۲۲	۰/۰۱	Base	۰/۳	-	۱ - ۱/۷	-	۰/۶	۰/۰۳



شکل 2- تصاویر میکروسکوپی از فصل مشترک اتصال Zr702/Ti در دمای

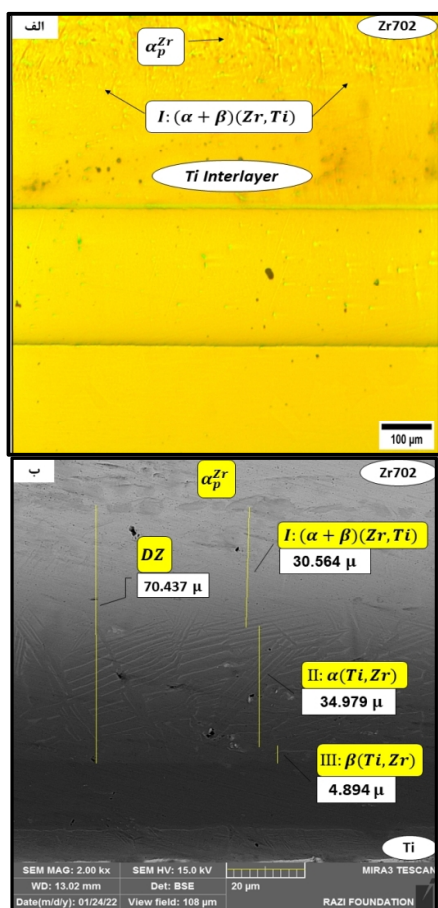
1000 °C و زمان 30 دقیقه الف- میکروسکوپ نوری ب- FESEM

ج- آنالیز EDS ناحیه اتصال نفوذی Zr/Ti در سمت فلز پایه Zr

د- آنالیز EDS ناحیه اتصال نفوذی Zr/Ti در سمت فلز پایه Ti

تشکیل محلول جامد و میزان انحلال پذیری خوب آن‌ها در نسبت‌های مختلف باشد [32-35]. در شکل (1) لایه‌میان‌ی Ti و فلز پایه Zr702 مشخص شده‌اند و ناحیه نفوذی به صورت یک لایه واکنشی روشن‌تر از زمینه آشکار است.

تصاویر میکروسکوپی از فصل مشترک اتصال Zr702/Ti در دمای 1000 °C و زمان 30 دقیقه در شکل (2) نشان داده شده است. شکل نشان می‌دهد که ناحیه نفوذی یا همان لایه واکنشی در فصل مشترک زیرکونیوم 702 و Ti به خوبی تشکیل شده است. همچنین از شکل تفاوت در میزان نفوذ متقابل اتم‌های زیرکونیوم و تیتانیوم به دلیل اختلاف در سرعت نفوذ آن‌ها و افزایش ضخامت لایه واکنشی در طرف زیرکونیوم به وضوح مشاهده می‌شود. تحقیقات پژوهشگران مختلف نیز نشان داده است که اتم‌های Ti با سرعت بیشتری به سمت Zr نفوذ می‌کند [32-34]. فصل مشترک اتصال با چهار ناحیه در تصویر 2-ب مشخص شده است (ناحیه I شامل دو بخش است که به صورت مشترک نشان داده شده است). بر اساس نتایج آنالیز EDS، سه ناحیه با ترکیب محلول جامد Zr در Ti و Ti در Zr آشکار است؛ در سمت زیرکونیوم 702 ناحیه  $(\alpha+\beta)_{(Zr,Ti)}$  و در سمت تیتانیوم نیز دو ناحیه  $\alpha_{(Ti,Zr)}$  و  $\beta_{(Ti,Zr)}$  مشاهده می‌شوند. در واقع ناحیه  $(\alpha+\beta)_{(Zr,Ti)}$  ناشی از تشکیل محلول جامد  $\alpha_{(Zr,Ti)}$  و  $\beta_{(Zr,Ti)}$  در اثر نفوذ عنصر تیتانیوم از لایه میانی به فلز پایه زیرکونیوم است. فاز  $\alpha_{Zr}^{Zr}$  نیز در فلز پایه Zr702 در هنگام سرد شدن و تغییر آلوتروپیک  $\alpha_{Zr} \rightarrow \beta_{Zr}$  در مرز دانه‌های  $\beta_{Zr}$  جوانه‌زنی کرده و تا دمای اتاق پایدار می‌ماند [32 و 35-36]. نتایج آنالیز EDS انجام شده نشان داد که ترکیب نواحی ذکر شده در این شرایط (دمای 1000 °C و زمان 30 دقیقه) به ترتیب  $\beta_{(Zr,Ti)} [78.4Zr, 21.1Ti]$  ،  $\alpha_{(Zr,Ti)} [56.3Ti, 42.6Zr]$  ،  $\alpha_{(Ti,Zr)} [72.1Ti, 23.8Zr]$  و  $\beta_{(Ti,Zr)} [85.1Ti, 9.8Zr]$  می‌باشد. ناحیه یک (I) در مجاورت Zr702 به صورت یک ناحیه دوفازی



شکل 3- تصاویر میکروسکوپی از فصل مشترک اتصال Zr702/Ti

در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  و زمان 30 دقیقه

الف - میکروسکوپ نوری ب - FESEM

در شکل (5) نتایج آنالیز خطی EDS فصل مشترک در دماهای مختلف نشان داده شده است. از شکل مشاهده می‌شود که نفوذ متقابل اتم‌های Ti و Zr در تمامی دماها به خوبی صورت گرفته و لایه واکنشی تشکیل گردیده است. تصاویر به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش دمای اتصال میزان نفوذ متقابل اتم‌ها افزایش یافته و شیب نفوذ آن‌ها تغییر کرده است. شکل همچنین نشان می‌دهد که نواحی متمایز I، II، و III در تمامی دماها تشکیل گردیده و با تغییر دمای اتصال، پهنای این نواحی که تابع میزان نفوذ اتم‌هاست تغییر کرده است. نتایج تعیین ضخامت لایه‌های واکنشی با استفاده از نرم‌افزار اندازه‌گیری مقیاس Digimizer، در شرایط مختلف اتصال در جدول (2) ارائه شده است.

شامل محلول جامد  $\alpha_{(Zr,Ti)}$  در زمینه محلول جامد  $\beta_{(Zr,Ti)}$  (فازهای سوزنی شکل در زمینه خاکستری روشن) مشخص شده است. افزایش دمای اتصال می‌تواند باعث افزایش تراکم و ضخامت سوزن‌های  $\alpha_{(Zr,Ti)}$  و محلول جامد  $\alpha_{(Ti,Zr)}$  گردد [33,34,36]. در شکل ناحیه (II) به صورت نواحی خاکستری روشن و دندریته‌های موازی یا همان سوزنی شکل مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج آنالیز EDS و دیاگرام فازی تیتانیوم-زیرکونیوم ناحیه II همان محلول جامد  $\alpha_{(Ti,Zr)}$  می‌باشد که به صورت نواحی دندریته در فصل مشترک اتصال تشکیل شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی در شکل (2-ب) نشان می‌دهد که به علت میزان نفوذ بیشتر عنصر Ti، این ناحیه از ضخامت بالاتری برخوردار است. بر اساس نتایج آنالیز EDS ناحیه سه (III)، از فاز  $\beta_{(Ti,Zr)}$  با رنگ خاکستری تیره و ساختاری ورقه‌ای و غنی از تیتانیوم تشکیل شده است. این ناحیه در پژوهش‌های دیگر محققان نیز شناسایی شده است [19 و 34].

شکل (3) فصل مشترک اتصال در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  و زمان 30 دقیقه را نشان می‌دهد. در این شکل نیز سه ناحیه مجزای تشکیل شده در فصل مشترک به تفکیک مشخص شده‌اند. شکل 3-ب نشان می‌دهد که با کاهش دمای اتصال به میزان  $50^{\circ}\text{C}$  نسبت به نمونه قبلی (دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  و زمان 30 دقیقه) میزان نفوذ اتم‌ها در فصل مشترک Zr/Ti کاهش یافته است. شکل نشان می‌دهد که با افزایش غلظت Zr در مجاورت ناحیه Zr702، ضخامت بشقاب‌ها (نواحی سوزنی شکل) کاهش یافته و تراکم آن‌ها افزایش یافته است. از تصویر FESEM در شکل (3-ب) به وضوح مشاهده می‌شود که با حرکت به سمت مرز ناحیه Zr702 تراکم سوزن‌ها افزایش یافته که در تطابق خوبی با نتایج دیگر محققان است [37]. شکل (4) فصل مشترک اتصال تولید شده با دمای اتصال  $900^{\circ}\text{C}$  و زمان 30 دقیقه را نشان می‌دهد. از شکل مشاهده می‌شود که با کاهش دمای اتصال نفوذی، میزان نفوذ و ضخامت لایه واکنشی نسبت به دو نمونه قبل کاهش یافته است. شکل نشان می‌دهد که تراکم نواحی سوزنی شکل (فاز  $\alpha_{(Zr,Ti)}$ ) با نزدیک شدن به فلز پایه Zr702 افزایش یافته و ضخامت آن‌ها کاهش یافته است.



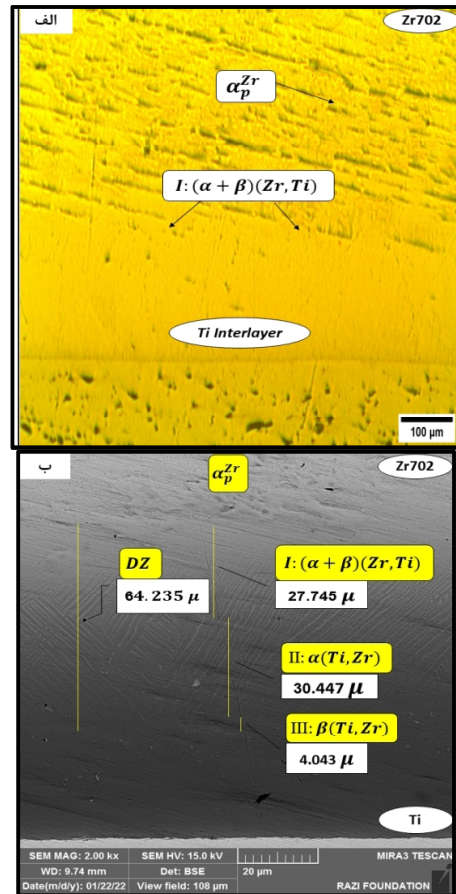
نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای اتصال از 900 °C به 1000 °C ضخامت لایه واکنشی از 64 به 84 میکرون افزایش یافته است. این افزایش محسوس در ضخامت لایه واکنشی (عمق نفوذ) با افزایش درجه حرارت، ناشی از وابستگی شدید نفوذ اتم‌ها به دما است [22 و 38]. وابستگی نفوذ اتم‌ها به دما براساس رابطه 1 مشخص می‌شود. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش دما سرعت نفوذ اتم‌ها به صورت نمایی افزایش می‌یابد، لذا با افزایش دما ضخامت لایه‌های واکنشی نیز افزایش یافته است. افزایش ضخامت لایه واکنشی بدون تشکیل فازهای بین‌فلزی مضر باعث افزایش استحکام و بهبود کیفیت اتصال می‌گردد.

$$D = D^0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

در این رابطه D ضریب نفوذ اتم‌ها، D<sup>0</sup> فاکتور فرکانس، Q انرژی اکتیواسیون نفوذ اتم‌ها، R ثابت گازها و T دما بر حسب کلوین است.

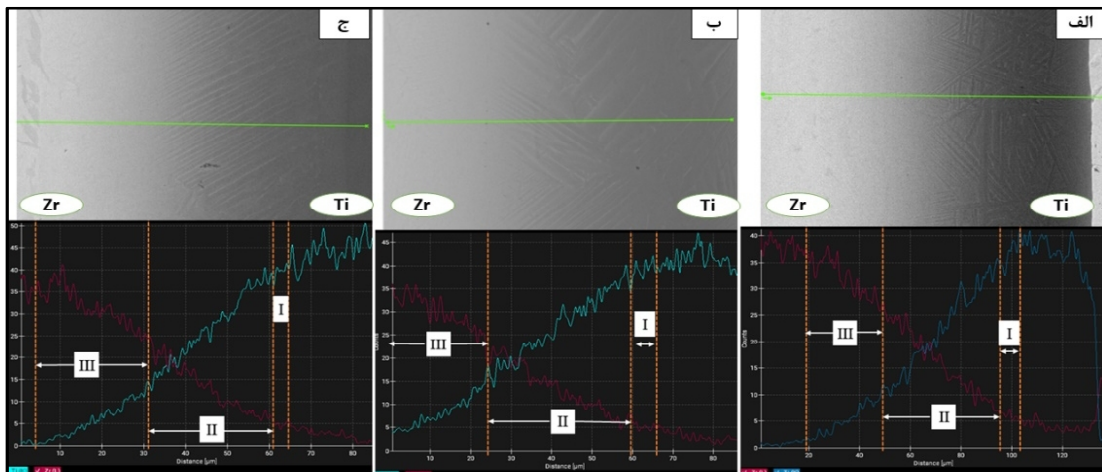
#### 4- نتیجه‌گیری

- فصل مشترک Ti/Zr702 در اتصال نفوذی Zr702 به فولاد A516 در همه دماهای اتصال پیوسته و بدون هرگونه ترک، حفره و ناپیوستگی مشاهده گردید.  
- لایه واکنشی مناسبی در دماهای 900، 950 و 1000 درجه سانتی‌گراد در فصل مشترک Ti/Zr702 در اتصال نفوذی Zr702 به فولاد A516 تشکیل گردید. با افزایش دمای اتصال ضخامت



شکل 4- تصاویر میکروسکوپی از فصل مشترک اتصال Zr702/Ti در دمای 900 °C و زمان 30 دقیقه الف- میکروسکوپ نوری ب- FESEM

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای اتصال از 900 °C به 1000 °C ضخامت لایه واکنشی از 64 به 84 میکرون افزایش



شکل 5- نتایج آنالیز خطی EDS فصل مشترک Ti/Zr702 در دماهای مختلف الف- 1000 °C ب- 950 °C ج- 900 °C

جدول 2- ضخامت لایه واکنشی و فازهای تشکیل شده در فصل مشترک در زمان اتصال 30 دقیقه و دماهای مختلف

ضخامت ( $\mu$ ) دما	$(\alpha + \beta) (Zr, Ti)$ (I)	$\alpha Ti$ (II)	$\beta Ti$ (III)	Diffusion Zone (DZ)
۱۰۰۰ °C	۳۲	۴۵	۷	۸۴
۹۵۰ °C	۳۱	۳۵	۵	۷۱
۹۰۰ °C	۳۰	۳۰	۴	۶۴

8- Burgers, W. G. "On the process of transition of the cubic-body-centered modification into the hexagonal-close-packed modification of zirconium." *Physica* 1.7-12 (1934): 561-586.

9- Hiwarkar, V. D., et al. "Annealing of cold worked two-phase Zr-2.5 Nb—Associated microstructural developments." *Journal of Nuclear Materials* 384.1 (2009): 30-37.

10- Crepin, J., et al. "Microstructural study of  $\beta$  treated grade 702 zirconium. Scanning electron microscopy and transmission electron microscopy, complementarity of two observational scales." *Journal of materials science* 32.18 (1997): 4841-4846.

11- Une, Katsumi, et al. "Crystallography of zirconium hydrides in recrystallized Zircaloy-2 fuel cladding by electron backscatter diffraction." *Journal of nuclear science and technology* 41.7 (2004): 731-740.

12- Rudling, Peter, et al. "Welding of Zirconium alloys." IZNA7 special topic report *Welding of Zirconium Alloys* (2007).

13- Slobodyan, Mikhail S. "METHODS OF CREATION OF PERMANENT ZIRCONIUM ALLOY JOINTS IN REACTOR ART. A REVIEW." (2016).

14- ASM International, Steels, Low-Alloy. "High-Strength Low-Alloy Steels." (2001).

15- Oyyaravelu, Ramachandran, Palaniyandi Kuppan, and Natarajan Arivazhagan. "Metallurgical and mechanical properties of laser welded high strength low alloy steel." *Journal of advanced research* 7.3 (2016): 463-472.

16- Atabaki, M. Mazar, M. E. Bajgholi, and E. H. Dehkordi. "Partial transient liquid phase diffusion bonding of zirconium alloy (Zr-2.5 Nb) to stainless steel 321." *Materials & Design* 42 (2012): 172-183.

17- Atabaki, M. Mazar, and A. Talebi Hanzaei. "Partial transient liquid phase diffusion bonding of Zircaloy-4 to stabilized austenitic stainless steel 321." *Materials characterization* 61.10 (2010): 982-991.

18- Taouinet, M., N. E. Kamel, and S. Lebaili. "Diffusion bonding between zircaloy-4 and 304L stainless steel in the presence of a eutectic." *Materials and manufacturing processes* 28.12 (2013): 1327-1334.

19- Ahmad, M., et al. "Diffusion bonding of stainless steel to Zircaloy-4 in the presence of a Ta intermediate layer." *Journal of nuclear materials* 317.2-3 (2003):

لایه واکنشی از 64 به 84 میکرون افزایش یافت.

- در فصل مشترک اتصال، فازها و ترکیبات بین‌فازی مضر مشاهده نشد.

- در فصل مشترک اتصال Zr/Ti در تمام دماها سه ناحیه مجزا به ترتیب شامل فازهای محلول جامد  $\beta_{(Ti,Zr)}$  و  $\alpha_{(Ti,Zr)}$  در طرف لایه Ti و فاز محلول جامد  $(\alpha+\beta)_{(Ti,Zr)}$  و  $\alpha_{p}^{Zr}$  در طرف فلز پایه زیرکونیوم 702 شناسایی شد.

- مشخص گردید که افزایش دما باعث افزایش ضخامت لایه واکنشی گردیده است. با افزایش دما اثری از تشکیل فازهای جدید در فصل مشترک اتصال مشاهده نگردید.

#### منابع

1- Cooper, Daniel R., and Julian M. Allwood. "Influence of diffusion mechanisms in aluminium solid-state welding processes." *Procedia engineering* 81 (2014): 2147-2152.

2- Zhang, Binggang, et al. "Microstructure and corrosion behavior of Zr-702 joined by electron beam welding." *Vacuum* 121 (2015): 159-165.

3- Yang, Shen, et al. "Microstructures and properties of zirconium-702 irradiated by high current pulsed electron beam." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 358 (2015): 151-159.

4-Guan, Haotian, et al. "Effects of  $\beta$  Air Cooling and Subsequent Cold Rolling on Microstructure and Hardness of Zr702 Sheet." *Metals and Materials International* (2019): 1-8.

5- Yau, Te-Lin, R. C. Sutherlin, and A. W. Chang. "Corrosion of Zirconium and Zirconium Alloys." *ASM Handbook* 13 (2005): 300-324.

6- Yau, T.L. 1996. *Corrosion Engineering Handbook*. New York: Marcel Dekker, p. 195.

7- Dai, Jiahong, et al. "Comparative study of microstructural characteristics and hardness of  $\beta$ -quenched Zr702 and Zr-2.5 Nb alloys." *Materials* 12.22 (2019): 3752.



- Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 31.4 (2016): 835-837.
- 34- Wang, Zeming, et al. "Microstructure and Mechanical Properties of Vacuum Diffusion Bonded Zr-4 Alloy Joint." *Crystals* 11.11 (2021): 1437.
- 35- Wang, Zhen, et al. "Effect of Bonding Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of 304L/Zircaloy 4 Diffusion Bonded Joints with Ni/Ta Hybrid Interlayer." *Advanced Engineering Materials* 23.12 (2021): 2100555.
- 36- ASTM Specification B551/B551M-12, Specification for Zirconium and Zirconium alloy strip, sheet, and plate.
- 37- ASM International, Steels, Low-Alloy. "High-Strength Low-Alloy Steels." (2001).
- 38- Murray, J. L. "The Ti-Zr (Titanium-Zirconium) system." *Bulletin of Alloy Phase Diagrams* 2.2 (1981): 197-201.
- 39- Akhter, J. I., et al. "Formation of dendritic structure in the diffusion zone of the bonded Zircaloy-4 and stainless steel 316L in the presence of Ti interlayer." *Journal of alloys and compounds* 399.1-2 (2005): 96-100.
- 40- Bhanumurthy, K., A. Laik, and G. B. Kale. "Novel method of Evaluation of Diffusion coefficients in Ti-Zr system." *Defect and Diffusion Forum*. Vol. 279. Trans Tech Publications Ltd, 2008.
- 41- He, Weijun, et al. "Effect of the annealing process on the microstructure and mechanical properties of multilayered Zr/Ti composites." *Materials Science and Engineering: A* 713 (2018): 214-222.
- 42- Zeng, Sheng, et al. "Effect of bonding temperature on the microstructure and mechanical properties of the diffusion-bonded joints of Zr705 alloy." *Materials Science and Engineering: A* 804 (2021): 140782.
- 43- Cezairliyan, A., and F. Righini. "Thermodynamic studies of the  $\alpha \rightarrow \beta$  phase transformation in zirconium using a subsecond pulse heating technique." *Journal of research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and chemistry* 79.1 (1975): 81.
- 44- Anvari S Z, Daneshpour S, Oshaghi S. Microstructure and mechanical properties evaluation of diffusion bonded joints of titanium to AISI 304 austenitic stainless steel. *JWSTI* 2020; 6 (2) :103-11
- 45- Kobayashi, Sengo, Kiyomichi Nakai, and Yasuya Ohmori. "Analysis of phase transformation in a Ti-10 mass% Zr alloy by hot stage optical microscopy." *Materials transactions* 42.11 (2001): 2398-2405.
- 46- Chandrappa, K., et al. "Optimization of process parameter of diffusion bonding of Ti-Al and Ti-Cu." *Materials Today: Proceedings* 27 (2020): 1689-1695.
- 212-216.
- 20- Bhanumurthy, K., et al. "Diffusion bonding of nuclear materials." *BARC Newsl* 331 (2013): 19-25.
- 21- Habisch, Stefan, et al. "The effect of interlayer materials on the joint properties of diffusion-bonded aluminium and magnesium." *Metals* 8.2 (2018): 138.
- 22- Huang, Bensheng, et al. "Effect of different interlayers on microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded joints between SiC and 316LN." *Philosophical Magazine* 102.2 (2022): 137-152.
- 23- Srikanth, V., A. Laik, and G. K. Dey. "Joining of stainless steel 304L with Zircaloy-4 by diffusion bonding technique using Ni and Ti interlayers." *Materials & Design* 126 (2017): 141-154.
- 24- Lin, J. M., et al. "An investigation on diffusion bonding of TZM alloy and Nb-Zr alloy using Ni foil as an interlayer." *Journal of Alloys and Compounds* 743 (2018): 780-788.
- 25- Atasoy, Evren, and Nizamettin Kahraman. "Diffusion bonding of commercially pure titanium to low carbon steel using a silver interlayer." *Materials characterization* 59.10 (2008): 1481-1490.
- 26- Kadhim, Zeyad D., Ali I. Al-Azzawi, and Sabah J. Al-Janabi. "Effect of the Diffusion Bonding Conditions on Joints Strength." *Journal of Engineering and Development* 13.1 (2009): 179-188.
- 27- Zeng, Sheng, et al. "Effect of bonding temperature on the microstructure and mechanical properties of the diffusion-bonded joints of Zr705 alloy." *Materials Science and Engineering: A* 804 (2021): 140782.
- 28- Kundu, S., and S. Chatterjee. "Effects of temperature on interface microstructure and strength properties of titanium-niobium stainless steel diffusion bonded joints." *Materials Science and Technology* 27.7 (2011): 1177-1182.
- 29- Mofid, M. A., and E. Loryaei. "Effect of bonding temperature on microstructure and intermetallic compound formation of diffusion bonded magnesium/aluminum joints." *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 51.4 (2020): 413-421.
- 30- saydi I, dehmolaie R, ranjbar K. Microstructural study of Ti/3YSZ interface in NI 105/Ni/Nb/Ti/3YSZ diffusion bonding. *JWSTI* 2022; 8 (1) :59-66
- 31- Zhang, Boxian, et al. "Spark Plasma Diffusion Bonding of TiAl/Ti2AlNb with Ti as Interlayer." *Materials* 13.15 (2020): 3300.
- 32-Li, Qiang, et al. "Microstructure and mechanical properties of Ti-Nb-Zr alloys prepared by spark plasma sintering." *Key Engineering Materials*. Vol. 727. Trans Tech Publications Ltd, 2017.
- 33- Liu, Guoxi, et al. "Fast welding of chromium carbide and nickel alloy by spark plasma sintering." *Journal of*