

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره2، پاییز و زمستان 1399، صفحه 117-103

# ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال نفوذی تیتانیم و فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304

سیده زهرا انوری<sup>1\*</sup>، سعید دانش پور<sup>2</sup>، صفورا عشاقی<sup>3</sup> 1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. 2-فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مواد (جوشکاری)، موسسه دانش پژوهان پیشرو، اصفهان. 3-عضو هیات علمی موسسه دانش پژوهان پیشرو، اصفهان. (دریافت مقاله: 1399/06/27 ؛ پذیرش مقاله: 1399/08/17)

چکیدہ

كلمات كليدى: تيتانيم، فولاد زنگ نزن، اتصال نفوذي، ميان لايه.

# Microstructure and mechanical properties evaluation of diffusion bonded joints of titanium to AISI 304 austenitic stainless steel

S. Z. Anvari<sup>1\*</sup>, S. Daneshpour<sup>2</sup>, S. Oshaghi<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University (PNU) 2- M. Sc Graduated, Daneshpajoohan Institute of Higher Education, Isfahan, Iran

3- Daneshpajoohan Institute of Higher Education, Isfahan, Iran (Received 17 September 2020 ; Accepted 7 November 2020)

\* نويسنده مسئول، پست الكترونيكي: <u>szaanvari@gmail.com</u>

#### Abstract

In this study, diffusion bonding between titanium and AISI 304 austenitic stainless steel by Ag interlayer was investigated. In order to carry out this research, samples prepared after surface preparation were placed inside the fixture and placed at the temperatures of 750,800 and 850 °C in the 30,60 and 90 min in the furnace under argon protective gas. The phase transformation and microstructure of diffusion bonding interfaces of the joints were studied using optical microscopy, scanning electron microscopy and x-ray diffraction. Then, the hardness of the samples was measured using a hardness test apparatus. Finally, the samples were tested after being placed in the shear strength test holder using a pressure test device and the shear strength of the samples was measured. Examination of optical microscopic images shows the diffusion of silver in titanium and the partial diffusion of silver in stainless steel. On the other hand, increasing the temperature increases the diffusion of silver in titanium and partially diffusion into stainless steel. The results of the XRD test on the samples showed that the temperature rise to 800 °C leads to the formation of TiAg and Ag<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub> intermetallic compounds, which the existence of TiAg intermetallic compound increases the hardness of the samples. For this reason, the sample at 800 °C showed the highest hardness. The shear strength of the samples showed that the increase in temperature increased the shear strength of the samples and decreased the shear strength by increasing the temperature above 850 °C due to the formation of brittle intermetallic compounds.

Keywords: Titanium, Stainless steel, Diffusion bonding, Interlayer.

این فرایند پارامترهای قابل توجه فشار، زمان، دما و خواص متالورژیکی است. امروزه جوشکاری نفوذی کاربردهای فراوانی در صنایع هوا-فضا و انرژی اتمی دارد [9 و10]. در زمینه انرژی اتمی، جوشکاری نفوذی در ساخت اجزای راکتورها استفاده میشود. یکی از اولین محصولات جوشکاری نفوذی ساخت المنتهای سوختی برای اولین راکتور تجاری آب فشرده شده است [11].

اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن به روش های حالت جامد بررسی شده است [12]. همچنین تحقیقات ارزشمندی در خصوص اتصال نفوذی تیتانیم و فولاد زنگ نزن صورت گرفته است[13-19]. بررسی های اولیه بر روی اتصال نفوذی تیتانیم و فولاد زنگ نزن نشان می دهد که ترکیبات بین فلزی بر پایه Fe و rr تشکیل می شود. هنگامی که آلیاژهای تیتانیم به طور مستقیم به فولاد زنگ نزن پیوند داده می شوند، بسیاری از ترکیبات بین فلزی TiFe و TiFe در اتصال جوش ایجاد می شود، زیرا حلالیت Ti در عوی است، Ti نیز تشکیل می شود. از طرف دیگر تشکیل TiFe می TiFe تیز تشکیل می شود. از طرف دیگر تشکیل TiFe می TiFe در اتوا تر بر شکنندگی اتصال جوش می شوند و از طرفی به دلیل تفاوت عمده ضریب انبساط و انتقال حرارت بین آلیاژ Ti و فولاد،

#### 1- مقدمه

تيتانيم و آلياژهاي آن يکي از بهترين مواد مهندسي براي کاربرد در صنعت به شمار می آیند [1و2]. تیتانیم و آلیاژهای آن به دلیل تشکیل فیلم اکسیدی پایدار، فوق العاده چسبنده و محافظ دارای مقاومت به خوردگی بالایی هستند [3]. به علاوه این آلیاژها دارای استحکام ویژه بالا، مقاومت فرسایشی خوب و دانسیته یایینی هستند. بنابراین به طور گسترده در صـنایع هـوا-فضـا و صنايع شيميايي مورد استفاده قرار مي گيرند [4]. اتصال تيتانيم و فولاد به دلیل خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی خوب مورد توجه قرار گرفته است. اتصال تیتانیم و فولاد زنگ نزن در صنعت هسته ای کاربرد دارد [5]. از اتصال فولاد به تیتانیم در کاربردهای پزشکی نیے استفادہ مے شود [6]. استفادہ از فرايندهاي جو شکاري متداول اين دو آلياژ همراه با جدايش میکروساختار و ترکیب شیمیایی، تمرکز تنش و تشکیل ترکیبات بين فلزى است [7و8]. ايجاد اتصال بين فولاد و تيتانيم با استفاده از روشهای ذوبی با مشکلاتی نظیـر تشـکیل فازهـای مضر مانند FeTi و TiC همراه است [6]. بنابراین یکی از روش های پیشنهادی برای اتصال تیتانیم و فولاد اتصال نفوذی است [5]. اتصال نفوذي فرآيند جوشكاري در حالت جامد است که در دمای بیشتر از نصف نقطه ذوب مواد انجام می شود. در ریزساختاری، تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ها تهیه شد و با استفاده از دستگاه XRD آنالیز فازی با هدف مشخص شدن فازهای موجود بر روی نمونه ها انجام شد. سپس سختی نمونه ها با استفاده از دستگاه سختی سنجی اندازه گیری شد. سرانجام نمونه ها به منظور بررسی مقاومت برشی با استفاده از دستگاه تست فشار مورد آزمایش استحکام برشی قرار گرفتند.

2- مواد و روش انجام آزمایش

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش مفتول فولاد زنگ نزن 304 و مفتول تیتانیم گرید 5 بود. مفتول فولاد و تیتانیم به صورت استوانههایی با قطر 4 میلیمتر و ارتفاع 7 میلیمترتوسط دستگاه وایرکات برش داده شدند. ترکیب شیمیایی فولاد و تیتانیم مورد استفاده و همچنین ترکیب شیمیایی استاندارد آنها در جدول (1) و (2) آورده شده است. از نقره خالص با درصد خلوص 98% که به میزان 84 درصد نورد سرد شده بود و با ضخامت 2/0 میلی متر به عنوان لایه میانی اتصال استفاده شد. به منظور ایجاد اتصال، نمونهها به صورتی که در شکل (1) نشان داده شده است روی یکدیگر قرار گرفتند و در فیکسچر (شکل (2)) قرار داده شدند. فیکسچر استفاده شده از پروفیل آهنی در ابعاد 3×3 سانتیمتر ساخته شدکه یک پیچ فولادی جهت نگهداری نمونهها و برقراری فشار بر روی آن تعبیه شده است.

فشار ثابت اعمالی با استفاده از یک گشتاورسنج بر روی نمونه ها اعمال گردید. نمونه ها در کوره ی الکتریکی با قابلیت عملیات حرارتی تحت گاز خنثی آرگون در دماها و زمان های مختلف نگهداری شدند. شرایط انجام تست و کد اختصاص داده شده به نمونه ها در جدول (3) آورده شده است. همچنین در تمامی اتصال ها فشار اعمالی MPa 8 انتخاب شد.

به منظور تعیین فازها و درصد آنها از روش پراش پرتو اشعهی ایکس به وسیلهی دستگاه XRD مدل فیلیپس استفاده شد و با استفاده از نرم افزار دستگاه XRD فازهای موجود با استفاده از عناصر اولیه تعیین شد. بررسیهای ریز ساختاری با استفاده از

تنش داخلی ایجاد می شود که منجر به ایجاد ترک می شود [5]. در زمينه اتصال نفوذي تيتانيم و فولاد تحقيقات فراواني انجام شده است که می توان به جوشکاری نفوذی این فلز به فولادهای مختلف با لایههای میانی متفاوت از جمله نیکل، نقـره، مـس و لایه های میانی ترکیبی اشاره کرد [20]. قوش و همکارانش [5] به بررسی اتصال تیتانیم و فولادزنگ نـزن آسـتنیتی 304 بـدون میان لایه در دمای 950 \_ 850 درجه سانتی گـراد تحـت فشـار 2 MPa پرداختند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که در اثر فرایند اتصال در ناحیه نفوذی در مجاور فولاد فاز σ و در مجاور تیتانیم محلول جامد β-Ti حاوی Cr ،Fe و Ni تشکیل شده است. همچنین در منطقه واکنش فازهای FeTi و Fe<sub>2</sub>Ti تشکیل شده است. در بررسی دیگری کاندا وهمکارانش [16] اتصال نفوذی بین تیتانیم خالص تجاری و فولاد رنگ نزن 304 با استفاده از میان لایه مس را مورد بررسی قرار دادند. بالاترین استحکام اتصال در دمای 900 درجه سانتی گراد به دست آمـد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش دمای اتصال باعث کاهش استحكام اتصال می شود. در تحقیقی الریفی و همكارانش [17] اتصال نفوذی تیتانیم به فولاد با استفاده از آلیاژ پایه مس به عنوان میان لایه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پیوند اتصالات در دمای پائینتر از 800 درجه سانتی گراد حتی به مدت 180 دقيقه امكان پذير نيست. با اين حال اتصالات در دمای 850 درجه سانتی گراد در هر مدت زمانی به طور موفقيت آميز انجام گرفت. از طرفي استفاده از ميان لايـه مـس باعث می شود از نفوذ و انتقال اتمی بین Ti و Fe یاC به طور مؤثر جلوگیری شود و بنابراین ترکیبات بین فلزیFe-Ti وTi-C و شکل نمی گیرند. هی و همکارانش [15] اتصال تیتانیم و فـولاد زنگ نزن با میان لایه نیکل را بررسمی و بهترین اتصال را در دمای 850 درجه سانتی گراد گزارش کردند.

در پژوهش حاضر به بررسی اتصال نفوذی بین فولاد زنگ نزن 304 و تیتانیم گرید 5 با میان لایهی نقره با هدف دستیابی به اتصال ایده آل با بیش ترین استحکام ممکن است. برای این منظور نمونههای تهیه شده در دماها و زمانهای مشخص درون کوره تحت گاز محافظ آرگون قرار گرفتند و برای بررسیهای

عنصر	Fe	Cr	Ni	С
نمونه استفاده شده (.wt))	مابقى	۱۸/۳۵	٨/٩	•/•۶
نمونه استاندارد (wt%)	مابقى	١٩	٩	•/•A

جدول1-آناليز تركيب شيميايي فولاد 304

جدول 2-آناليز تركيب شيميايي تيتانيم گريد 5

عنصر	Ti	Al	V
نمونه استفاده شده (.wt)	٩٣/۴٣	4/22	۲/۱۳
نمونه استاندارد (.wt)	مابقى	۵/۵۰	٣/۵٠

جدول 3-شرایط انجام تست و کد اختصاص داده شده به نمونه ها

زمان اتصال (دقيقه)	دمای اتصال	كد نمونه
۶.	v۵۰°C	750T60M
٩٠	v۵۰°C	750T90M
17.	v۵۰°C	750T120M
۶.	٨٠٠°C	800T60M
٩٠	۸۰۰°C	800T90M
17.	۸۰۰°C	800T120M
۶.	۸۵۰°C	850T60M
٩٠	۸۵۰°C	850T90M
12.	۸۵۰°C	850T120M

مدل H25KS مورد آزمایش قرار گرفتند و میزان استحکام برشی هر یک از نمونه ها اندازه گیری شد. در شکل (3) تصویر شماتیک نگهدارنده ی آزمون استحکام برشی آورده شده است. همچنین در شکل (4) نحوه ی قرارگیری نمونه ها در نگهدارنده ی آزمون استحکام برشی نشان داده شده است.

3-نتایج و بحث 3-1-نحوه اتصال و بررسی های ریزساختاری و فازی در بررسی نمونه های اتصال یافته مشخص شد که در زمان کمتر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل SEM مدل FEI ESEM میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل QUANTA 200 توسط آشکارساز CDA مدل EDAS مال EDS Silicon Drift 2017 انجام شد. به منظور بررسی سختی نمونههای اتصال یافته، از دستگاه میکروسختی سنجی به روش ویکرز با نیروی 0/1 کیلوگرم با زمان نشست 10 ثانیه بر روی نمونهها استفاده شد. جهت به دست آوردن استحکام برشی قطعات جوشکاری شده نمونهها از نگهدارندهای از جنس آهن استفاده شد. نمونهها پس از قرار گرفتن در نگهدارنده، با استفاده از دستگاه تست فشار هانسفیلد

از 60 دقیقه برای هیچ کدام از دماها و در دمای کمتر از 750 درجه سانتی گراد به دلیل دمای ناکافی جهت کامل شدن نفوذ، برای هیچ یک از زمانها اتصالی صورت نگرفت. به طور کلی می توان گفت برای انجام این آزمایش محدودیت هایی از نظر دما، زمان و فشار وجود دارد. اگر دما به بیش از 850 درجه سانتی گراد افزایش یابد، میان لایه نقره به نقط ه ی ذوب خود نزدیک میشود و شروع به تغییر حالت میکند. در این صورت فشار به صورت خودکار کاهش می یابد. زمانی که فشار از 2 MPa کمتر می شود، هیچ نقطه ی اتصالی میان فلـز پایـه و میان لایه اتفاق نمی افتـد. از طـرف دیگـر اگـر فشـار بیشـتر از 5 MPa شود تغيير فرم پلاستيک اتفاق ميافتد. اگر زمان انجام آزمایش کمتر از 60 دقیقه باشد به دلیل زمان ناکافی برای انجام واکنش های نفوذ، فرایند اتصال اتفاق نمی افتـد. از طـرف دیگـر اگر زمان انجام آزمایش از 120 دقیقه بیشتر شد اتصال قوی اتفاق نمیافتد که دلیل آن را می توان به تغییر شکل پلاستیک نمونهها و همچنین تشکیل ترکیبات ترد بین فلزی ارتباط داد. با توجه به ظاهر نمونه های اتصال یافته در نمونه های با کد 800T60M ،750T90M و 850T60M اتصال قوى برقرار شد. بنابراین در ادامه خواص اتصال این نمونهها مورد ارزيابي قرار گرفت.



شکل4- نحوهی قرارگیری نمونه ها در نگهدارندهی آزمون استحکام برشی



شکل 1-تصویر شماتیک قرار گرفتن نمونه های اتصال بر روی یکدیگر



شکل 2-نحوه قرارگیری نمونه ها در فیکسچر



شکل3- تصویر شماتیک نگهدارنده ی آزمون استحکام برشی

850T60m	800T60M	750T90M	750T60M	نمونه
۱۸/۸	۱۵/۸	17/1	17/3	اندازه دانه تیتانیم(µm)

جدول 4-اندازه دانه نمونه های اتصال یافته

	جدول 5-استحكام برشي نمونه هاي اتصال يافته		
TONE			

850T60M	800T60M	750T90M	750T60M	كد نمونه
18.	1.1	47	۵۶	استحکام برشی(MPa)



شكل 5-تصاوير ميكروسكوپى نورى الف) 750T60M، ب) 850T60M، چ) 800T60M و د)

در تصاویر تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ نوری (شکل (5)) اتصال و نفوذ مناسب در اتصال نقره- تیتانیم به وضوح قابل مشاهده است. همانگونه که از تصاویر میکروسکوپی نوری مشخص شده است با افزایش دما، طول ناحیه ی نفوذی افزایش یافته که علت آن افزایش نفوذ اتمها ب افزایش دماست. در تحقیقاتی که تاکنون در زمینه جوشکاری نفوذی انجام شده است با افزایش دمای فرآیند جوشکاری طول ناحیه ی نفوذی افزایش یافته است.

با توجه به تصاویر، مشاهده می شود که با افزایش دما و زمان اتصال اندازهی دانه در نمونهها تا حدودی افزایش یافته است.

که این افزایش برای نمونههای تیتانیم محسوس تر میباشد. به منظور بررسی دقیق تـر، میانگین انـدازه ی دانـهی تیتـانیم در نمونههای اتصال یافته با استفاده از نرم افزار Image J اندازه گیری شد و نتایج در جدول (4) آورده شده است. با توجه به جدول، افزایش دما و زمان باعث افزایش اندازهی دانه در نمونه های اتصال یافته شده است که دلیل این افزایش را می توان به احاطه شدن دانههای کوچک توسط دانه های بزرگتر در نتیجه ی افزایش دما و زمان اتصال نسبت داد. همان گونه که آتاسای و همکارانش [21] در پژوهش خود که در آن اتصال نفوذي بين تيتانيم خالص تجاري و فولاد كم كربن



شکل6- حفرات کرکندال تشکیل شده در لایه نقره در نمونه 750T90M



شکل 7-تصاویر میکروسکوپی الکترونی نمونه های (الف) 750T60M (، ب) 750T90M (ج) 800T60M و د)

با میـان لایه نقره را بررسی کردند به این نتیجـه دسـت یافتنـد. آنها پس از مشاهده تصـاویر میکروسـکوپی نمونـههـا بعـد از اتصال دریافتند که اندازه دانه در نمونههای اتصال یافته با افزایش دما و زمان اتصال افزایش مییابد. لازم به ذکر است رشـد بیش

از حد اندازهی دانه مطلوب نیست و می تواند آثار مخربی بر روی نمونه داشته باشد. در پژوهشی ولموروگان و همکارانش [22] اتصال نفوذی فولاد و تیتانیم را بدون استفاده از میان لایه در محدوده دمای 650 تا 800 درجه سانتی گراد در



شکل 8-تصاویر میکروسکوپی الکترونی نمونه های الف) 750T60M، ب) 800T60M م و د) 800T60M و 10000 با بزرگنمایی 10000 بر ابر



شكل P-آزمون EDS نمونه ى 750T90M

به منظور بررسی بیش تر ناحیه ی اتصال از نمونه ها تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شد. شکل(7) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه ها را نشان میدهد. زمان 30 دقیقه مورد بررسی قرار دادند آنها نیز پس از بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه ها دریافتند با افزایش دما، اندازه ی ذرات تیتانیم افزایش مییابد.در شکل (6) حفراتی در نمونه 750T90M مشاهده می شود با مقایسه شکل، موقعیت و اندازه این حفرات با مراجع [23-25] این حفرات را میتوان به عنوان حفرات ناشی از اثر کرکندال تلقی کرد. بر اساس اثر بیشتری خواهند داشت و بالعکس. بر این اساس فلزی که نقطه ذوب کمتری دارد به داخل فلزی که نقطه ذوب بالاتری دارد نقطه ذوب کمتری دارد سمت فلز با نقطه ذوب کمتری دارد به داخل فلزی که نقطه دوب بالاتری دارد نقطه ذوب کمتری دارد به داخل فلزی که نقطه زوب بالاتری دارد میشود می کند و به دلیل این نفوذ، جاهای خالی در سمت فلز با نقطه ذوب کمتر افزایش می یابد. این جاهای خالی در سمت فلز با می شود. وجود این حفرات در نقره موید نفوذ نقره در تیتانیم به می شود. وجود این حفرات در نقره موید نفوذ نقره در تیتانیم به علت نقطه ذوب پایین تر نقره نسبت به تیتانیم است.



eZAF	Smart	Quant	Results
------	-------	-------	---------

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	
AgL	87.16	75.45	1260.65	
TiK	8.63	16.82	126.23	
VK	4.22	7.73	57.27	



شكل10-تصوير أزمون EDS نمونه 750T60M در منطقه اتصال

سطح اتصال نقره - تیتانیم و نقره - فولاد نمونه 750T90M انجام شد. بر اساس نمودار حاصل از این آزمون که در شکل (9) نشان داده شده است، نقره در تیتانیم نفوذ کرده در صورتی که در محل اتصال نقره - فولاد، نفوذ نقره بسیار جزیی بوده است. تشکیل محلول جامد هنگامی میسر است که اختلاف شعاع اتمی دو عنصر کمتر از 21/0 باشد. اگر اختلاف شعاع اتمی بیش از 21/0 باشد، تشکیل محلول جامد بسیار محدود است [26]. شعاع اتمی نقره و آهن ( 20/0)، آهن محلول جامد اختلاف ناچیز شعاع اتمی نقره و آهن ( 20/0)، احتمال تشکیل محلول جامد نقره در آهن قابل توجیه است. از سوی دیگر به دلیل اختلاف قابل قبول شعاع اتمی نقره و تیتانیم (0/20)، تشکیل در تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، عناصری که عدد جرمی بیشتری دارند به دلیل جذب بیشتر پرتو الکترونی تصویر روشن تری نسبت به عناصر با عدد جرمی کمتر، خواهند داشت. مناطق روشن نقره و مناطق تیره تیتانیم میباشد. با توجه به این تصاویر، اتصال قابل قبولی برای تیتانیم و نقره وجود دارد که در منطقهی اتصال هیچ گونه ترک و یا ناحیه بدون نفوذ مشاهده نمی شود. شکل (8) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی تهیه شده از منطقهی نقوذ نقره در تیتانیم با بزرگنمایی بیشتر را نشان می دهد. با توجه به تصاویر منطقهی روشن نقره، منطقه ی تیره به منظور تایید نفوذ نقره در تیتانیم و عدم نفوذ نقره در فرلاد، آزمون طیف سنجی تفکیک انرژی پرتوی ایکس (EDS) در



eZAF Smai	rt Quan	t Results
-----------	---------	-----------

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
AIK	11.06	28.45	203.78
AgL	71.14	45.76	1109.37
TiK	17.8	25.79	303.38



شکل11-تصویر آزمون EDS نمونه 850T60M در منطقه ی اتصال

دماهای بالا، از سطح اتصال به سمت بیرون پیش می رود و میزان نفوذ با فاصله گرفتن از محل اتصال افزایش می یابد [21]. نتایج حاصل از پراش پرتوی ایکس نمونههای اتصال یافته در دماها و زمانهای مختلف در شکل (12) نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می شود در دمای 750 است. همان گونه که در شکل مشاهده می شود در دمای 750 درجه سانتی گراد و زمان 60 دقیقه فازهای موجود عبارتند از Fe و T. در دمای 750 درجه سانتی گراد و زمان 90 دقیقه، فازهای موجود Fe و Ti هستند با این تفاوت که شدت پیکها افزایش یافته است. با افزایش دما به 800 درجه سانتی گراد فازهای موجود Ga و TiAg درجه افزایش دما به 800 درجه مانتی گراد مو تراه موجود Fe و TiAg درجه تشار می شود و فازهای موجود Fe محلول جامد نقره در تیتانیم بسیار ناچیز خواهد بود و بیشتر به صورت ترکیبات بین فلزی تشکیل می شوند.

به منظور بررسی دقیق تر نمونه ها و میزان نفوذ نقره در تیتانیم، تصاویر حاصل از آزمون EDS نمونه های 750T60M و 850T60M در فصل مشترک تقره و تیتانیم به ترتیب در شکلهای (10) و (11) آورده شده است. همان گونه که مشاهده میشود با افزایش دما از 750 درجه سانتی گراد به 850 درجه سانتی گراد، درصد وزنی نقره از 85/16 به 17/14 کاهش یافته است. از طرفی درصد وزنی تیتانیم از 8/63 به 17/14 افزایش یافته است. این بدان معناست که درصد وزنی نقره در منطقه نفوذی وابسته به دما است. پس می توان بیان کرد فلز نقره در



شكل12-الگوى پراش پرتوى ايكس نمونه هاى اتصال يافته

کردند که وجود ترکیب بین فلزی TiAg باعث افزایش سختی در نمونه ها می شود. در تحقیق دیگری، زارانیک و همکارانش [29] ساختار و خواص آلیاژهای تولید شده از تیتانیم و تقره به روش متالوژی پودر را مورد بررسی قرار دادند. آن ها ترکیبات بین فلزی TiAg را دارای ساختار همگن، چگالی کم و خواص مکانیکی مطلوب دانستند. کورت و همکارانش [30] نیز از وجود ترکیبات بین فلزی در فرایند اتصال نفوذی خبر دادند. آن ها اتصال نفودی فولاد فریتی با تیتانیم را بدون استفاده از میان لایه مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند ترکیبات بین فلزی TiAg و Te\_1 بعد از اتصال در فصل مشترک اتصال به وجود آمدند.

# 2-3-خواص مكانيكي

پروفیل میکروسختی تهیه شده از نمونهها در شکل (13) ارایـه شده است. همان گونه کـه انتظار مـیرفـت سـختی در فصـل مشترک نقره- تیتانیم در همه نمـونهها نسبت به بقیه قسمتهای سانتی گراد، شدت برخی از پیکها کاهش یافته است دلیل آن را می توان به کاهش درصد وزنی نقره در دماهای بالا در سطح اتصال نسبت داد. لازم به ذکر است در نرم افزار X'Pert کـد مرجع فازهای Ga<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub> ، Ti ، Fe و TiAg به ترتیب 23298 مرجع فازهای ته 60500 است. کاندا و همکارانش [27] در پژوهش خود که در آن اتصال نفوذی بین تیتانیم خالص و فولاد زنگ نزن 304 با استفاده از میان لایه مس را بررسی کردند گزارش دادند که فازهای تشکیل شده و میزان ترکیبات بینفلزی در فصل مشترک با افزایش دمای فرآیند، افزایش مییابد.

قوش و همکارانش [5] در تحقیقی اتصال نفوذی فولاد با تیتانیم را بدون استفاده از میان لایه مورد بررسی قرار دادند آنها نیز در پژوهش خود دریافتند که افزایش دما سبب تشکیل فازهای جدید در منطقهی اتصال میشود. با توجه به تحقیقاتی که تاکنون پیرامون ویژگیهای ترکیب بین فلزی TiAg انجام شده است؛ چون گو و همکارانش [28] در پژوهشی ریز ساختار و خواص ترکیب بین فلزی TiAg را بررسی کردند آنها بیان



شكل 13-پروفيل ميكروسختي نمونه هاي اتصال يافته

تیتانیم انجام داده اند شاهد افزایش سختی در ناحیه ی نفوذی بودند. آنها دلیل افزایش سختی در فصل مشتر ک اتصال را تشکیل محلول جامد و شکل گیری ترکیبات بین فلزی در این ناحیه دانسته اند. این محققین در تحقیق دیگری که در آن اتصال نفودی تنگستن و فولاد با میان لایه ی نیکل را مورد بررسی قرار دادند نیز به این نتیجه دست یافتند که سختی در منطقه ی اتصال به دلیل به وجود آمدن ترکیبات بین فلزی، بیشتر از سایر قسمته است. همچنین بیان کردند افزایش دما باعث افزایش این ترکیبات و در نتیجه افزایش سختی خواهد شد [32]. ویلموروگان و همکارانش [22] در پژوهش خود درباره اتصال نفوذی تیتانیم و فولاد بدون استفاده از میان لایه دریافتند سختی در منطقه ی اتصال، به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی افزایش می یابد. آنها همچنین بیان کردند با افزایش دما از 050 به 800 مریابد. آنها همچنین بیان کردند با افزایش دما از 050 به می می یابد. آنها همچنین بیان کردند با افزایش دما از مین افزایش

## 3-3-استحكام برشى

استحکام برشی نمونه های اتصال یافته در جدول (5) آورده شده است. در این بررسی نمونه ی 850T60M بیش ترین و نمونه 750T90M کمترین میزان استحکام برشی را داشته است، از

نمونه دارای مقدار بیشینه است که علت آن حضور ترکیب بین فلزی TiAg در فصل مشترک است و نمونهی 800T60M دارای بیش ترین مقدار سختی در فصل مشترک نقره-تیتانیم است. برای همه نمونه ها با فاصله گرفتن از فصل مشترک میزان سختی در دو طرف فصل مشترک کاهش می یابد و کمترین سختی مربوط به نقره است. به عبارت دیگر ضعیفترین بخش اتصال مربوط به نقره می باشد. در ناحیه ی نفوذی در فصل مشترک تیتانیم نقرہ نمونہی 850T60M علی رغم دارا بودن فاز TiAg دارای سختی در محدوده 500 تا 550 ویکرز است که این مقدار کمتر از سختی نمونه 800T60M درهمین ناحیه (حدود 650 ويكرز) است. دليل اين امر را مي توان رشد بيش از اندازه دانه های آن در اثر افزایش دما دانست. به طور کلی مي توان گفت سختي با افزايش دما، به دليل تشكيل تركيبات بین فلزی افزایش می یابد. اما افزایش بیش از حد دما موجب رشد دانه و در نتیجهی آن کاهش سختی میشود. در سمت مقابل سختی در فصل مشترک نقره- فولاد افزایش نیافته است ولى سختى نسبت به نقره اندكى بيشتر است كه مي توان دليل آن را تشکیل مقدار اندک ترکیب بین فلزی Fe<sub>3</sub>Ag<sub>2</sub> دانست. ژانگ و همکارانش [31] در تحقیقی که درباره ی ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال نفوذی فولاد و تنگستن با میان لایه

سلطانی و همکارانش [33] پیرامون اتصال نفوذی بین فولاد و تیتانیم با میان لایهی ترکیبی AgCuZn، پس از بررسی استحکام برشی نمونههای اتصال، دریافتند که محدوده استحکام نمونهها بین 48 تا 85 مگاپاسکال میباشد.و افزایش دما از 860 درجهی سانتی گراد و زمانهای بیشتر از 30 دقیقه را با کاهش استحکام برشی توام میداند. ویلموروگان و همکارانش [22] در پژوهش خود که دربارهی اتصال نفوذی تیتانیم و فولاد دریافتند استحکام برشی نمونههای اتصال یافته، با افزایش دما افزایش مییابد.

## 4-نتيجه گيرى

در این پژوهش به بررسی اتصال تیتانیم و فولاد زنگ نـزن 304 با استفاده از روش اتصال نفوذی و میان لایه نقره پرداخته شـد. مهم نتایج به دست آمده عبارتست از:

 در بین نمونه های جوشکاری شده نمونه های اتصال یافته در شرایط C 60min - 750°C، 2°00min - 750°C، 2°00min-800°C
۵0min - 850°C دارای اتصال بهتری نسبت به بقیه نمونه ها بودند.

 بر اساس بررسیهای ریز ساختاری، با افزایش دما و زمان، میزان منطقهی نفوذی افزایش یافته است. ولی افزایش دما با رشد دانهها همراه است.

 3. نتایج آزمون SEM بیانگر نفوذ نقره در تیتانیم و نفوذ جزیی نقره در فولاد است.

4. به دلیل نقطهی ذوب پایین تر نقره نسبت به تیتانیم و نفوذ نقره در آن، در میان لایه نقره حفرات کرکندال مشاهده شده است.

5. بر اساس نتایج آزمون EDS، با افزایش دما از 750 به 850 درجهی سانتی گراد، در نقطهی مشابه در ناحیهی نفوذی درصد وزنی نقره کاهش و درصد وزنی تیتانیم افزایش یافت. به عبارت دیگر، درصد وزنی نقره در ناحیهی نفوذی وابسته به دماست.

6. فازها و ترکیبات تشکیل شده در دمای 750 درجه سانتی گراد Fe، و Ti است و با افزایش دما به 800 درجهی سانتی گراد

سوی دیگر شکست در همهی نمونهها از سمت اتصال فولاد-نقره بوده است. با توجه به جدول، دما و زمان اتصال بر روى استحکام برشی نمونههای اتصال یافته تاثیر دارد به ایـن ترتیـب که در دمای 750 درجهی سانتی گراد و زمان 60 دقیقه استحکام برشی نمونه 56 مگایاسکال است و هنگامی که در همین دما زمان اتصال به 90 دقيقه افزايش مي يابد استحكام برشي نمونه به 32 مگاپاسکال کاهش می یابد. از طرف دیگر نتایج آزمون، افزایش استحکام برشی نمونهها را با افزایش دمای اتصال نشان میدهد. بیش ترین استحکام برشی مربوط به دمای 850 درجهی سانتی گراد و زمان 60 دقیقه است. در حالی که کمترین استحکام برشی مربوط به دمای 750 درجـه و زمـان 90 دقیقـه است. از اینرو میتوان نتیجه گرفت استحکام برشی با افـزایش دما به دلیل تشکیل ترکیب بینفلزی TiAg افزایش می یابد. همچنین زمانهای بیشتر از 60 دقیقه استحکام برشی نمونهها را به دلیل بزرگ شدن بیش از حد انـدازه دانـه و همچنـین تغییـر شکل پلاسـتیک ناحیـهی اتصـال کـاهش مـیدهـد. ژانـگ و همكارانش [31] نيز در پژوهش خود با افزايش دما ابتدا شـاهد افزایش استحکام و سپس کاهش آن بود. وی دلیل ایـن کـاهش استحکام برشی را تغییر شکل پلاستیک در منطقه ی اتصال عنوان كرده است. همچنين دليـل اسـتحكام پـايين نمونـههـاي اتصال یافته در دماهای کم را عدم نفوذ کامل در یک دیگر بیان کرده است. کورت و همکارانش [30] نیز در تحقیق خود که در آن اتصال نفوذی بین تیتانیم گرید 5 و فولاد زنگ نـزن فریتی بدون استفاده از میان لایه را مورد بررسی قرار دادند به این نتیجه دست یافتند که استحکام برشی نمونهها با افزایش دما تـا 850 درجه ی سانتی گراد افزایش یافت. در تحقیق دنگ و همکارانش [19] در زمینهی اتصال نفوذی فولاد و تیتانیم، استحکام نمونهها را در سـه دمـای 825، 850 و 875 درجـه ی سانتی گراد مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد استحکام در دمای 850 درجه ی سانتی گراد از سایر نمونهها بیشتر است. به عبارت دیگر استحکام تا دمای 850 درجه ی سانتی گراد ب افزایش دما افزایش می یابد و در دماهای بیش تر از 850 درجه سانتی گراد استحکام نمونهها کاهش مییابد. در پـژوهش

[9] Anon., Diffusion welding, Welding Hand book, chapter 52, section 38, 6th edition, 1971.

[10] Duarte L.I., Ramos A.S., Vieira M.F., Viana F., Vieira M.T., Kocak M., "Solid-state diffusion bonding of gamma-TiAl alloys using Ti/Al thin films as interlayers", Intermetallics, Vol.14, pp.1151-1156, 2006. [11] Lee H.S., Diffusion bonding of metal alloys in aerospace and other applications: Welding and Joining of Aerospace Materials, Wood head Publishing Limited, UK, p. 320, 2012.

[12] عبدالوند ر.، عطاپور م.، شمعانیان م.، علافچیان ع.، "امکان پذیری اتصال فاز مایع گذرای فولاد زنگ نزن دو فازی UNS S32750 به فولاد آستنیتی"AISI 304 ، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال سوم، شماره 1، پاییز و زمستان 1396، صفحه 8-1.

[13] Bhanumurty K., Kale G.B., "Reactive diffusion between titanium and stainless steel", J. Mater. Sci. Lett., Vol.12, pp. 1879, 1993.

[14] Changqing X, Zangpeng J., "The evalution of microstructure and diffusion paths in the titanium-steel explosion weld interface during heat treatment", J. Less Common Mater. 162 (1990) 315-322.

[15] He P., Zhang J., Zhou R., Li X., "Diffusion Bonding Technology of a Titanium Alloy to a Stainless Steel Web With an Ni Interlayer", Materials Characterization, Vol.43, pp. 287–292, 1999.

[16] Kunda S., Ghosh M., Laik A., Bhanumurthy K., Kale, G., Chatterjee, S., "Diffusion bonding of commercially pure titanium to 304 stainless steel using copper interlayer", Materials Science Engineering A, Vol. 407, pp. 154-160, 2005.

[17] Elrefaey A., Tillaman, W., "Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 2746-2752, 2009.

[18] Cooke K.O., Richardson A., Khan T.I., Muhammad Ali Shar, High-Temperature Diffusion Bonding of Ti– 6Al–4V and Super-Duplex Stainless Steel Using a Cu Interlayer Embedded with Alumina Nanoparticles, J. Manuf. Mater. Process., Vol. 4, pp. 3-14, 2020.

[19] Deng, Y., Sheng, G., Xu, C., "Evaluation of the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints of titanium to stainless steel with a pure silver interlayer", Materials and Design, Vol. 46, pp. 84-87, 2013.

[20] Zhang Y., Chen Y. K., Zhou J. P., Sun D.Q., Li H.M., "Laser Welding of TC4 Ti Alloy and 304 Stainless Steel with Different Joining Modes", International Journal of Metallurgy and Metal Physics, Vol. 5, pp.1-7, 2020.

[21] Atasay E., Kahraman N., "Diffusion bonding of commercially pure titanium to low carbon steel using a silver interlayer", Materials characterization, Vol. 59, pp. 1481-1490, 2008.

[22] Velmurugan, C., Senthilkumar, V., Sarala, S., Arivarasan, J., "Low temperature diffusion bonding of Ti-6Al-4V and duplex stainless steel", Journal of علاوه بر فازهای Ti ،Fe فازهای TiAg و Fe<sub>3</sub>Ag<sub>2</sub> نیز تشکیل شدند. در واقع با افزایش دما میزان این ترکیبات بینفلزی افزایش یافته است. 7. بیشترین میزان سختی در فصل مشترک نقره- تیتانیم است که

علت آن تشکیل ترکیبات بین فلزی در این منطقه است و بیشترین سختی متعلق به نمونهی 800T60M است. 8. دما و زمان اتصال بر روی استحکام برشی نمونههای اتصال یافته تاثیر دارد. استحکام برشی با افزایش دما افزایش می یابد. همچنین زمانهای بیشتر از 60 دقیقه استحکام برشی نمونهها را کاهش می دهد. استحکام برشی نمونه ی 850T60M مقدار بیشینه است.

[1] Kahraman N., Gulenc B., Findik F., "Corrosion and mechanical-microstructural aspects of dissimilar joints of Ti6Al4V and Al plates", Int J Impact Eng, Vol. 34, pp. 1423–32, 2007.

[2] Barreda J.L., Santamaria F., Azpiroz X., Irisarri A.M., Varona J.M., "Electron beam welded high thickness Ti6Al4V plates using filler metal of similar and different composition to the base plate", Vacuum Vo. 62. pp. 143-150, 2001.

[3] Evren A., Nizamettin K., "Diffusion bonding of commercially pure titanium to low carbon steel using a silver interlayer", Materials Characterization, Vol. 59, pp.1481-1490, 2008.

[4] Balasubramanian, M., "Development of processing windows for diffusion bonding of Ti - 6Al - 4V titanium alloy and 304 stainless steel with silver as intermediate layer", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 25, pp. 2932–2938, 2015.

[5] Ghosh, M., Bhanumurthy, K., Kale, G., Krishnan, J., Chatterjee, S., "Diffusion bonding of titanium to 304 stainless steel", Journal of nuclear materials, Vol. 322, pp. 235-241, 2003.

[7] He P., Zhang J., Zhou R., Li X., "Diffusion bonding technology of a titanium alloy to a stainless steel web with an Ni interlayer", Mater. Charact. 43 (1999), 288.

[8] Aleman B., Gutierrez I., Urcola J.J., "Interface microstructures in diffusion bonding of titanium alloys to stainless and low alloy steel", Mater. Sci. Technol. 9, (1993) 633.

منابع

Applied Surface Science, Vol. 257, pp. 10692-10698, 2011.

[29] Szaraniec, B., Goryczka, T., "Structure and properties of Ti-Ag alloys produced by powder metallurgy", Journal of Alloys and compounds, Vol. 709, pp. 462-472, 2017.

[30] Kurt, B., Orhan, N., Evin, E., Calik, A., "Diffusion bonding between Ti–6Al–4V alloy and ferritic stainless steel" Materials Letters, Vol. 61, pp. 1747-1750, 2007.

[31] Zhong Z., Hinoki, T., Nozawa, T., Park, Y., Kohyama, A., "Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints between tungsten and F82H steel using a titanium interlayer", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 489, pp. 545-551, 2010.

[32] Zhong Z., Jung H., Hinoki T., Kohyama A., "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. 120, pp. 1805-1810, 2010.

[33] Soltani Tashi R., Akbari Mousavi S.A.A., Mazar Atabaki, M., "Diffusion brazing of Ti–6Al–4V and austenitic stainless steel using silver-based interlayer", Materials and Design, Vol. 54, pp. 161-167, 2014.

Materials Processing Technology, Vol. 234, pp. 272-279, 2016.

[23] Kundu S., Chatterjee S., "Characterization of diffusion bonded joint between titanium and 304 stainless steel using a Ni Interlayer", Materials characterization, Vol. 59. pp.631-637, 2008.

[24] Kundu S., Chatterjee S., "Diffusion bonding between commercially pure titanium and micro-duplex stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 480. pp.316-322, 2008.

[25] Sabetghadam H., Zarei Hanzaki A., Araee A., "Diffusion bonding of 410 stainless steel to copper using anickel interlayer", Materials characterization, Vol. 61. pp.626-634, 2010.

[26] Sidney H. Avner, Introduction to physical metallurgy, McGRAW-HILL Book Company, 1974.

[27] Kundu, S., Ghosh, M., Chatterjee, S., "Diffusion bonding of commercially pure titanium and 17-4 precipitation hardening stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 428, pp. 18–23, 2006.

[28] Guo, C., Chen, B., "Microstructure and tribological properties of TiAg intermetallic compound coating",