علوم و فناوری جوشکاری ایران

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[1*]، سعید دانش پور[2]، صفورا عشاقی[3]

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)

چکیده

در این پژوهش به بررسی اتصال نفوذی بین تیتانیم و فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 با استفاده از میان لایه نقره پرداخته شد. به منظور انجام این پژوهش، نمونه های تهیه شده پس از آماده سازی سطحی درون فیکسچر قرار گرفتند و در دماهای 750، 800 و 850 درجه‌ی سانتی‌گراد در سیکل‌های زمانی 30، 60 و 90 دقیقه درون کوره قرار گرفتند. ریزساختار منطقه‌ی اتصال و تغییرات فازی فصل مشترک اتصال با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و پراش پرتوی ایکس بررسی شد. سپس با استفاده از دستگاه سختی سنجی، سختی نمونه‌های اتصال اندازه‌گیری شد و در آخر استحکام برشی نمونه‌ها اندازه گیری شد. بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری بیانگر نفوذ نقره در تیتانیم و نفوذ جزیی نقره در فولاد زنگ نزن بود. از طرفی افزایش دما سبب افزایش ناحیه‌ی نفوذی و همچنین بزرگ شدن اندازه‌ی دانه در نمونه‌ها شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده از نمونه‌ها نیز نفوذ نقره در تیتانیم و نفوذ جزیی آن در فولاد زنگ نزن را تایید کردند. نتایج آزمون آنالیز فازی بر روی نمونه‌ها نشان داد افزایش دما به 800 درجه سانتی‌گراد باعث تشکیل ترکیبات بین فلزی TiAg و Ag_3Fe_2 می‌شود که وجود ترکیب بین‌فلزی TiAg باعث افزایش سختی در نمونه‌ها می‌شود به همین دلیل نمونه در 800 درجه سانتی‌گراد بیشترین سختی را در منطقه‌ی اتصال تحت آزمایش سختی سنجی نشان داد. بررسی مقاومت برشی نمونه ها نشان داد افزایش دما باعث افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها می‌شود و با افزایش دما از 850 درجه به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده مقاومت برشی کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: تیتانیم، فولاد زنگ نزن، اتصال نفوذی، میان لایه.

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

S. Z. Anvari [1*], S. Daneshpour [2], S. Oshaghi[3]

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)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: szaanvari@gmail.com

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]

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 region as well as increasing the grain size in the specimens. SEM images from the samples also confirmed 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_3Fe_2 intermetallic compounds, which the existence of TiAg intermetallic compound increases the hardness of the sample. 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.

1- مقدمه

تیتانیم و آلیاژهای آن یکی از بهترین مواد مهندسی برای کاربرد در صنعت به شمار می‌آیند [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 پایینی هستند. بنابراین به طور گسترده در صنایع هوا-فضا و صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار می گیرند [4]. اتصال تیتانیم و فولاد به دلیل خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی خوب مورد توجه قرار گرفته است. اتصال تیتانیم و فولاد زنگ نزن در صنعت هسته‌ای کاربرد دارد [5]. از اتصال فولاد به تیتانیم در کاربردهای پزشکی نیز استفاده می‌شود [6]. استفاده از فرایندهای جوشکاری متداول این دو آلیاژ همراه با جدایش میکروساختار و ترکیب شیمیایی، تمرکز تنش و تشکیل ترکیبات بین فلزی است [7و8]. ایجاد اتصال بین فولاد و تیتانیم با استفاده از روش‌های ذوبی با مشکلاتی نظیر تشکیل فازهای مضر مانند FeTi و TiC همراه است [6]. بنابراین یکی از روش‌های پیشنهادی برای اتصال تیتانیم و فولاد اتصال نفوذی است [5]. اتصال نفوذی فرآیند جوشکاری در حالت جامد است که در دمای بیشتر از نصف نقطه ذوب مواد انجام می‌شود. در 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 روش‌های حالت جامد بررسی شده است [12]. همچنین تحقیقات ارزشمندی در خصوص اتصال نفوذی تیتانیم و فولاد زنگ نزن صورت گرفته است[13-19]. بررسی‌های اولیه بر روی اتصال نفوذی تیتانیم و فولاد زنگ نزن نشان می‌دهد که ترکیبات بین فلزی بر پایه Fe، Cr و Ni تشکیل می‌شود. هنگامی که آلیاژهای تیتانیم به طور مستقیم به فولاد زنگ نزن پیوند داده می‌شوند، بسیاری از ترکیبات بین فلزی TiFe و $TiFe_2$ در اتصال جوش ایجاد می‌شود، زیرا حلالیت Ti در Fe بسیار کم است. همچنین از آنجایی که تیتانیم عنصر کاربیدزای قوی است، TiC نیز تشکیل می‌شود. از طرف دیگر تشکیل TiFe، $TiFe_2$، TiC سبب شکنندگی اتصال جوش می شوند و از طرفی به دلیل تفاوت عمده ضریب انبساط و انتقال حرارت بین آلیاژ Ti و فولاد،

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]

تنش داخلی ایجاد می‌شود که منجر به ایجاد ترک می‌شود [5].
در زمینه اتصال نفوذی تیتانیم و فولاد تحقیقات فراوانی انجام شده است که می‌توان به جوشکاری نفوذی این فلز به فولادهای مختلف با لایه‌های میانی متفاوت از جمله نیکل، نقره، مس و لایه‌های میانی ترکیبی اشاره کرد [20]. قوش و همکارانش [5] به بررسی اتصال تیتانیم و فولادزنگ نزن آستنیتی 304 بدون میان لایه در دمای 950 ـ 850 درجه سانتی گراد تحت فشار 2 MPa پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که در اثر فرایند اتصال در ناحیه نفوذی در مجاور فولاد فاز σ و در مجاور تیتانیم محلول جامد β-Ti حاوی Fe، Cr و Ni تشکیل شده است. همچنین در منطقه واکنش فازهای FeTi و Fe_2Ti 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 آمد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش دمای اتصال باعث کاهش استحکام اتصال می‌شود. در تحقیقی الریفی و همکارانش [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 دقیقه امکان پذیر نیست. با این حال اتصالات در دمای 850 درجه سانتی گراد در هر مدت زمانی به طور موفقیت آمیز انجام گرفت. از طرفی استفاده از میان لایه مس باعث می‌شود از نفوذ و انتقال اتمی بین Ti وFe یاC به طور مؤثر جلوگیری شود و بنابراین ترکیبات بین فلزیFe-Ti وTi-C شکل نمی‌گیرند. هی و همکارانش [15] اتصال تیتانیم و فولاد زنگ نزن با میان لایه نیکل را بررسی 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 ریزساختاری، تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ها تهیه شد و با استفاده از دستگاه XRD آنالیز فازی با هدف مشخص شدن فازهای موجود بر روی نمونه‌ها 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 ضخامت0/2 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 نمونه‌ها اعمال گردید. نمونه ها در کوره‌ی الکتریکی با قابلیت عملیات حرارتی تحت گاز خنثی آرگون در دماها و زمان‌های مختلف نگهداری شدند. شرایط انجام تست و کد اختصاص داده شده به نمونه‌ها در جدول (3) آورده شده است. همچنین در تمامی اتصال‌ها فشار اعمالی 3 MPa 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

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]

جدول1-آنالیز ترکیب شیمیایی فولاد 304

عنصر	Fe	Cr	Ni	C
نمونه استفاده شده (.%wt)	مابقی	۱۸/۳۵	۸/۹	۰/۰۶
نمونه استاندارد (%wt)	مابقی	۱۹	۹	۰/۰۸

جدول 2-آنالیز ترکیب شیمیایی تیتانیم گرید 5

عنصر	Ti	Al	V
نمونه استفاده شده (.%wt)	۹۳/۴۳	۴/۲۳	۲/۱۳
نمونه استاندارد (.%wt)	مابقی	۵/۵۰	۳/۵۰

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

کد نمونه	دمای اتصال	زمان اتصال(دقیقه)
750T60M	۷۵۰°C	۶۰
750T90M	۷۵۰°C	۹۰
750T120M	۷۵۰°C	۱۲۰
800T60M	۸۰۰°C	۶۰
800T90M	۸۰۰°C	۹۰
800T120M	۸۰۰°C	۱۲۰
850T60M	۸۵۰°C	۶۰
850T90M	۸۵۰°C	۹۰
850T120M	۸۵۰°C	۱۲۰

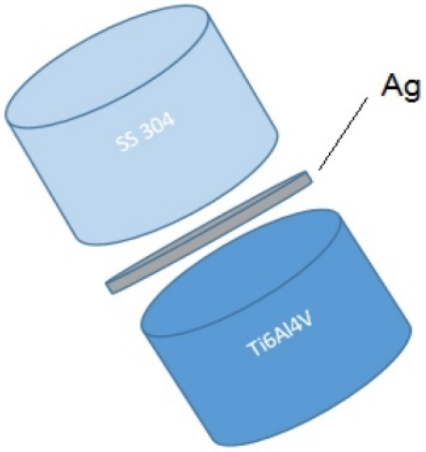
میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM) مدل FEI ESEM QUANTA 200 انجام شد. آنالیز عنصری فازهای مختلف، توسط آشکارساز EDAX مدل EDS Silicon Drift 2017 انجام شد. به منظور بررسی سختی نمونه‌های اتصال یافته، از دستگاه میکروسختی سنجی به روش ویکرز با نیروی 0/1 کیلوگرم با زمان نشست 10 ثانیه بر روی نمونه‌ها استفاده شد. جهت 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 مدل H25KS مورد آزمایش قرار گرفتند و میزان استحکام برشی هر یک از نمونه‌ها اندازه گیری شد. در شکل (3) تصویر شماتیک نگهدارنده‌ی آزمون استحکام برشی آورده شده است. همچنین در شکل (4) نحوه‌ی قرارگیری نمونه ها در نگهدارنده‌ی آزمون استحکام برشی نشان داده شده است.

3-نتایج و بحث

3-1-نحوه اتصال و بررسی‌های ریزساختاری و فازی

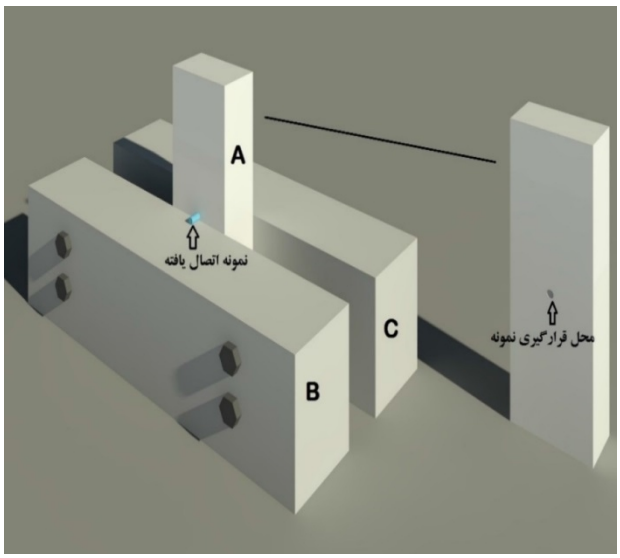
در بررسی نمونه‌های اتصال یافته مشخص شد که در زمان کمتر

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]



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

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 می‌توان گفت برای انجام این آزمایش محدودیت‌هایی از نظر دما، زمان و فشار وجود دارد. اگر دما به بیش از 850 درجه سانتی گراد افزایش یابد، میان لایه نقره به نقطه ی ذوب خود نزدیک می‌شود و شروع به تغییر حالت می‌کند. در این صورت فشار به صورت خودکار کاهش می‌یابد. زمانی که فشار از 2 MPa کمتر می شود، هیچ نقطه ی اتصالی میان فلز پایه و میان لایه اتفاق نمی‌افتد. از طرف دیگر اگر فشار بیشتر از 5 MPa شود تغییر فرم پلاستیک اتفاق می‌افتد. اگر زمان انجام آزمایش کمتر از 60 دقیقه باشد به دلیل زمان ناکافی برای انجام واکنش‌های نفوذ، فرایند اتصال اتفاق نمی‌افتد. از طرف دیگر 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 نمونه‌های با کد 750T60M، 750T90M، 800T60M و 850T60M اتصال قوی برقرار شد. بنابراین در ادامه خواص اتصال این نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

شکل4- نحوه‌ی قرارگیری نمونه ها در نگهدارنده‌ی آزمون استحکام برشی

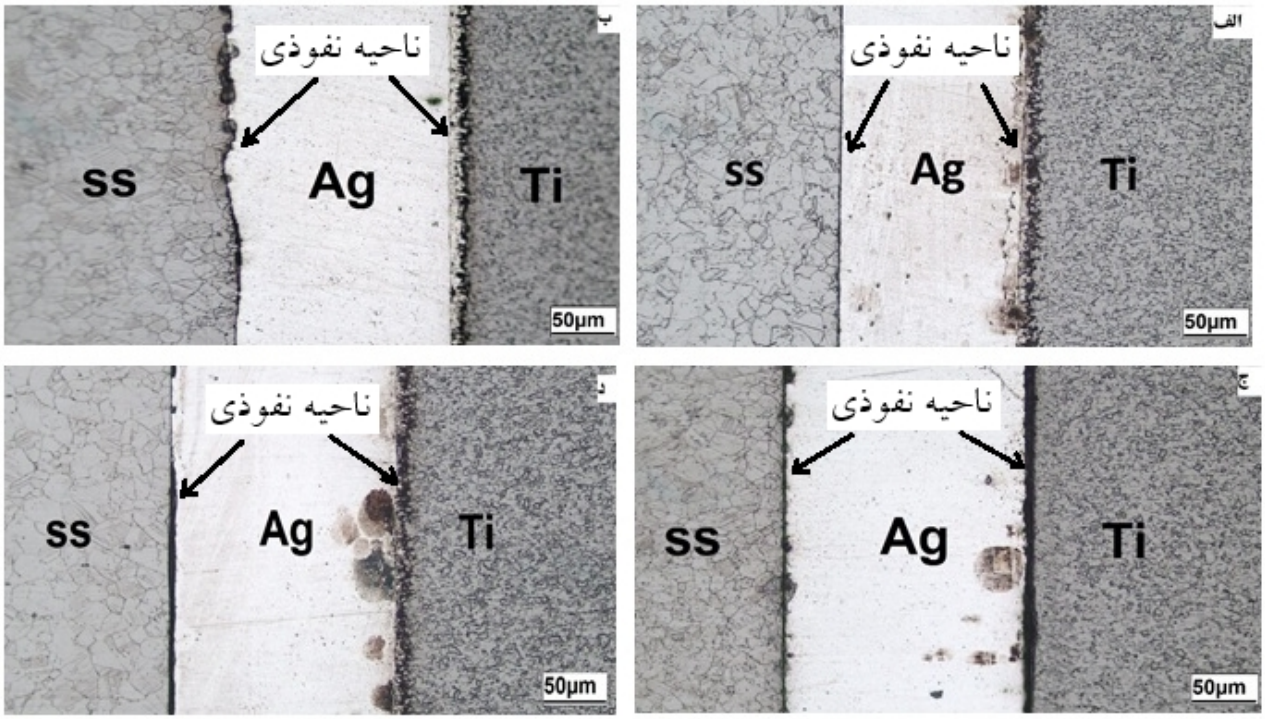
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]

جدول 4-اندازه دانه نمونه های اتصال یافته

نمونه	750T60M	750T90M	800T60M	850T60m
اندازه دانه تیتانیم(μm)	۱۲/۳	۱۳/۷	۱۵/۸	۱۸/۸

جدول 5-استحکام برشی نمونه های اتصال یافته

کد نمونه	750T60M	750T90M	800T60M	850T60M
استحکام برشی(MPa)	۵۶	۳۲	۱۰۱	۱۶۰



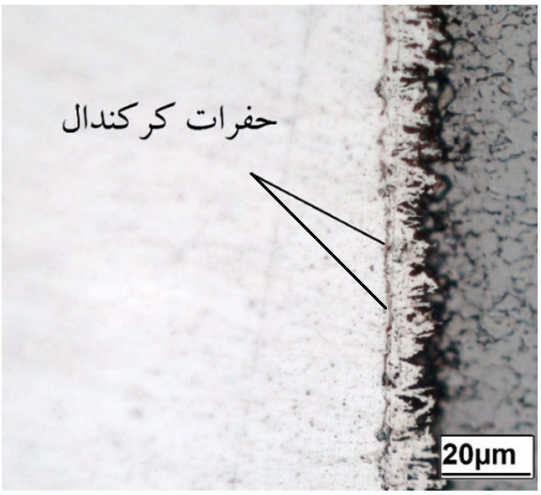
شکل 5-تصاویر میکروسکوپی نوری الف) 750T60M، ب) 750T90M، ج) 800T60M و د) 850T60M

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 با 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.

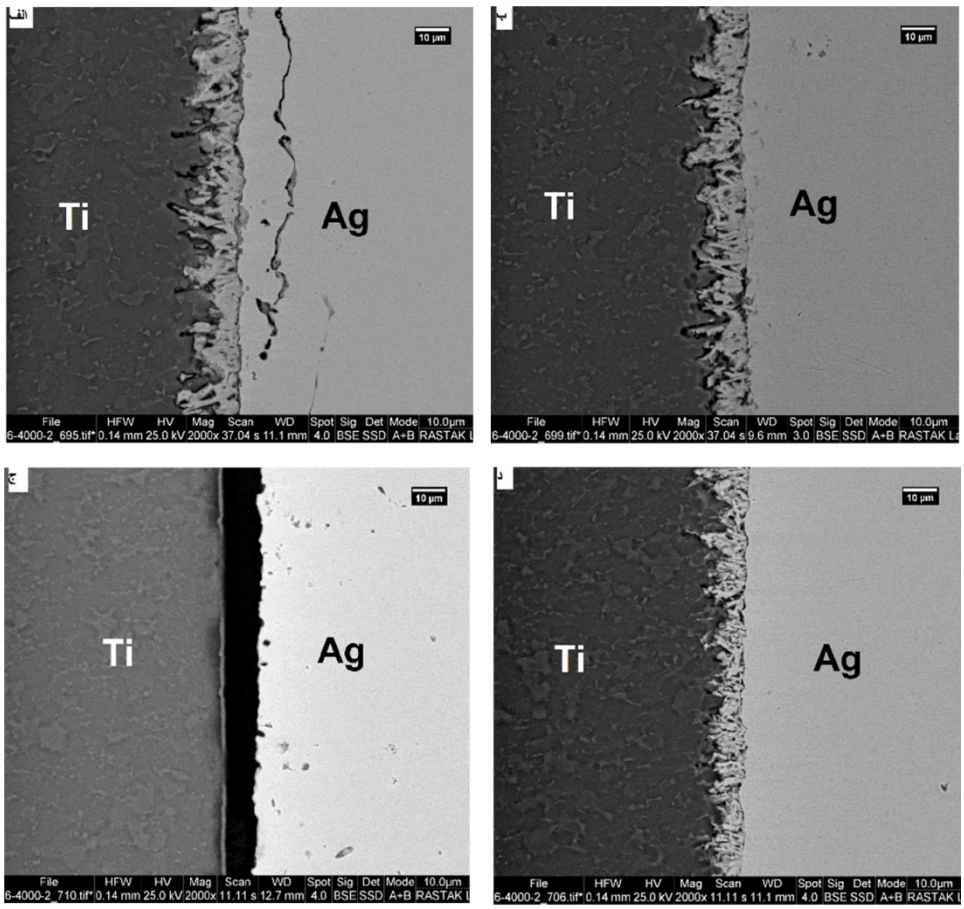
با توجه به تصاویر، مشاهده می شود که با افزایش دما و زمان اتصال اندازه‌ی دانه در نمونه‌ها تا حدودی افزایش یافته است. که این افزایش برای نمونه‌های تیتانیم محسوس تر می‌باشد. به منظور بررسی دقیق تر، میانگین اندازه ی دانه‌ی تیتانیم در نمونه‌های اتصال یافته با استفاده از نرم افزار Image J اندازه‌گیری شد و نتایج در جدول (4) آورده شده است.

با توجه به جدول، افزایش دما و زمان باعث افزایش اندازه‌ی دانه در نمونه‌های اتصال یافته شده است که دلیل این افزایش را می‌توان 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 نفوذی بین تیتانیم خالص تجاری و فولاد کم کربن

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]



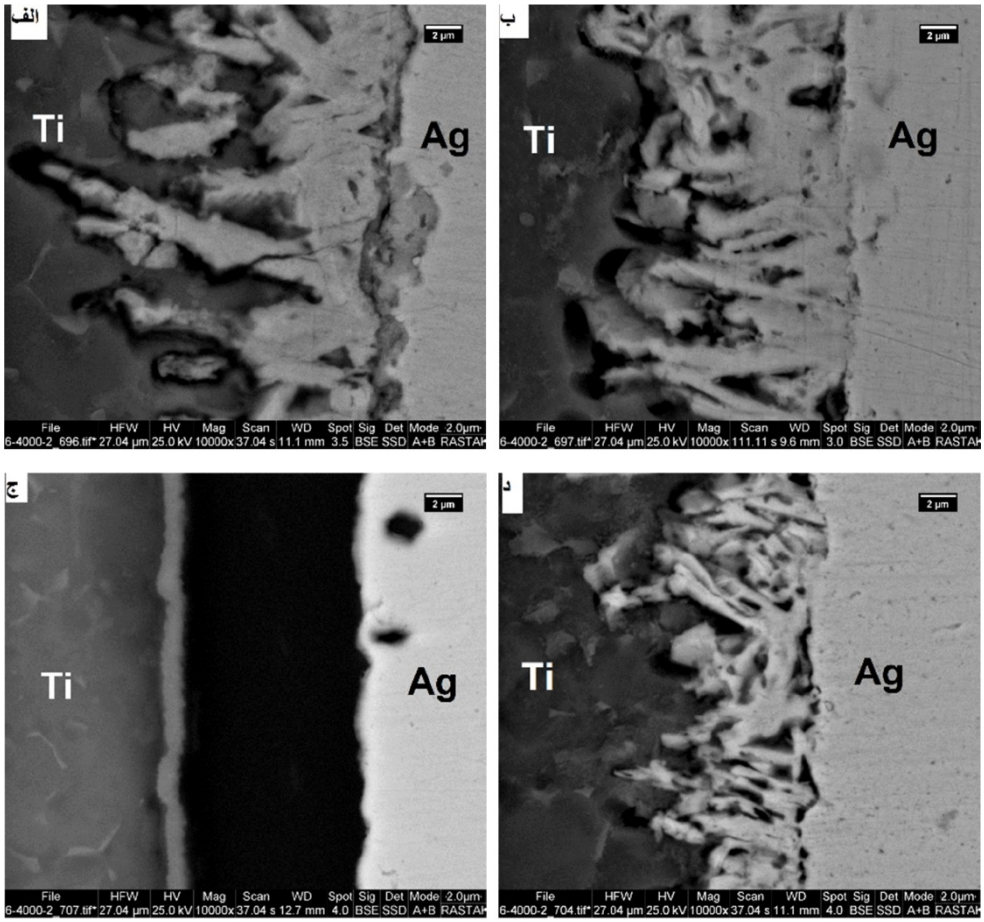
شکل6- حفرات کرکندال تشکیل شده در لایه نقره در نمونه 750T90M



شکل 7-تصاویر میکروسکوپی الکترونی نمونه های (الف) 750T60M، ب) 750T90M، ج) 800T60M و د) 850T60M

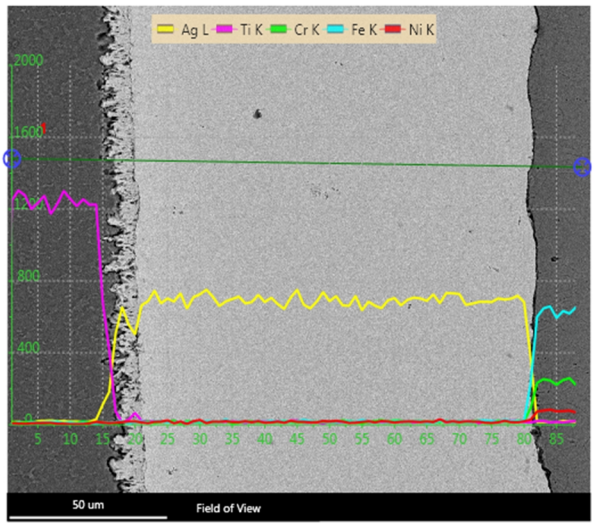
با میان لایه نقره را بررسی کردند به این نتیجه دست یافتند. آن‌ها پس از مشاهده تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ها بعد از اتصال دریافتند که اندازه دانه در نمونه‌های اتصال یافته با افزایش دما و زمان اتصال افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است رشد بیش از حد اندازه‌ی دانه مطلوب نیست و می‌تواند آثار مخربی بر روی نمونه داشته 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 سانتی‌گراد در

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]



شکل 8-تصاویر میکروسکوپی الکترونی نمونه‌های الف) 750T60M، ب) 750T90m، ج) 800T60M و د)850 T60M با بزرگنمایی 10000 برابر

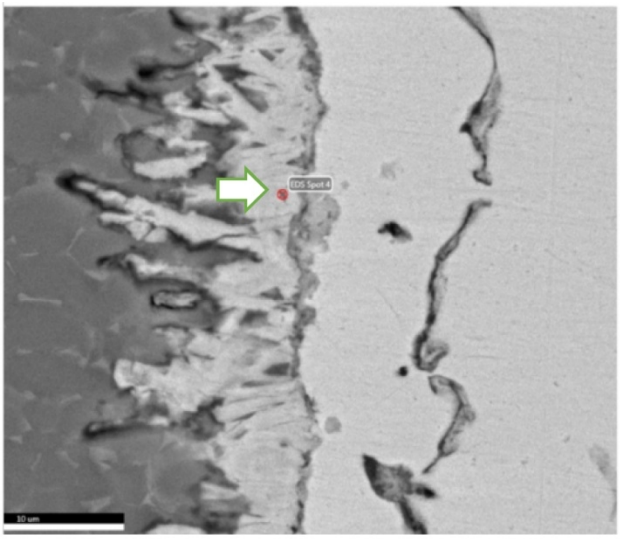
زمان 30 دقیقه مورد بررسی قرار دادند آن‌ها نیز پس از بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها دریافتند با افزایش دما، اندازه ی ذرات تیتانیم افزایش می‌یابد.در شکل (6) حفراتی در نمونه 750T90M مشاهده می‌شود با مقایسه شکل، موقعیت و اندازه این حفرات با مراجع [23-25] این حفرات را می‌توان به عنوان حفرات ناشی از اثر کرکندال تلقی کرد. بر اساس اثر کرکندال فلزاتی که نقطه ذوب کمتری دارند، ضریب نفوذ بیشتری خواهند داشت و بالعکس. بر این اساس فلزی که نقطه ذوب کمتری دارد به داخل فلزی که نقطه ذوب بالاتری دارد نفوذ می کند و به دلیل این نفوذ، جاهای خالی در سمت فلز با نقطه ذوب کمتر افزایش می یابد. این جاهای خالی تشکیل حفره می‌دهند که به این حفرات، حفرات کرکندال گفته می‌شود. وجود این حفرات در نقره موید نفوذ نقره در تیتانیم به علت نقطه ذوب پایین تر نقره نسبت به تیتانیم است.



شکل 9-آزمون EDS نمونه ی 750T90M

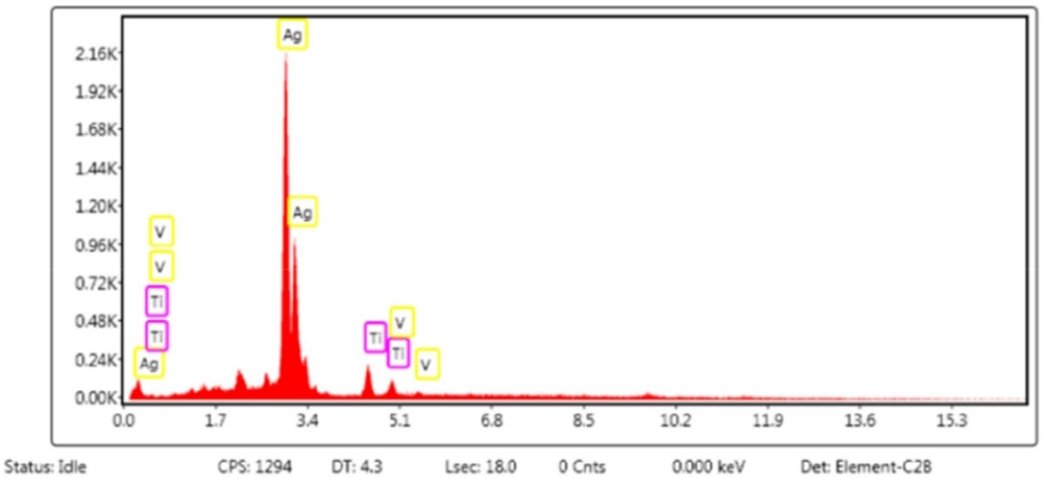
به منظور بررسی بیش تر ناحیه ی اتصال از نمونه‌ها تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شد. شکل(7) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]



eZAF Smart Quant Results

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

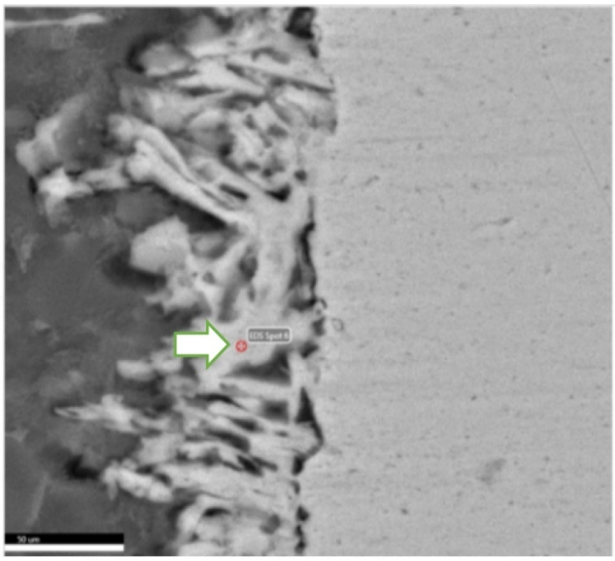


شکل10-تصویر آزمون EDS نمونه 750T60M در منطقه اتصال

در تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، عناصری که عدد جرمی بیشتری دارند به دلیل جذب بیشتر پرتو الکترونی تصویر روشن‌تری 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 نمی‌شود. شکل (8) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی تهیه شده از منطقه‌ی نقوذ نقره در تیتانیم با بزرگنمایی بیشتر را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر منطقه‌ی روشن نقره، منطقه ی تیره تیتانیم و منطقه ی خاکستری ناحیه ی نفوذی را نشان می‌دهد.

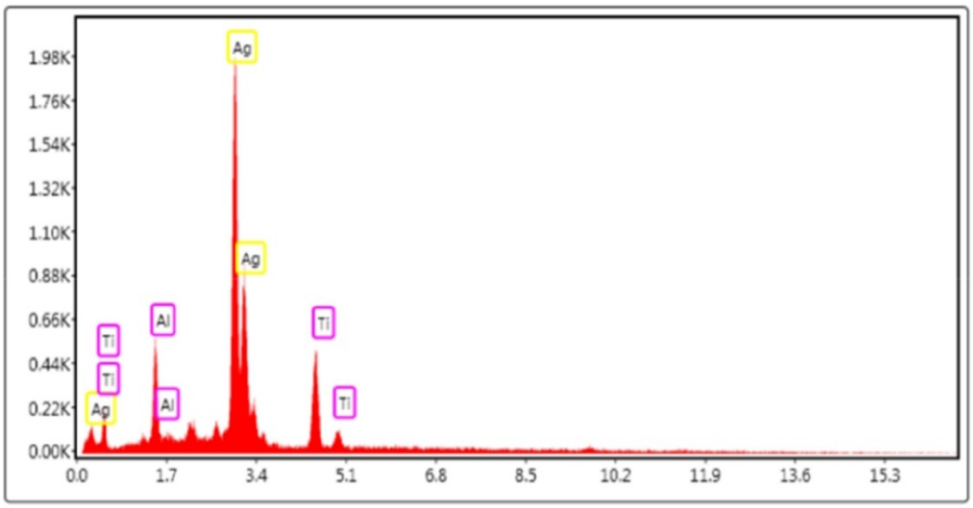
به منظور تایید نفوذ نقره در تیتانیم و عدم نفوذ نقره در فولاد، آزمون طیف سنجی تفکیک انرژی پرتوی ایکس (EDS) در سطح اتصال نقره- تیتانیم و نقره- فولاد نمونه 750T90M انجام شد. بر اساس نمودار حاصل از این آزمون که در شکل (9) نشان داده شده است، نقره در تیتانیم نفوذ کرده در صورتی که در محل اتصال نقره- فولاد، نفوذ نقره بسیار جزیی بوده است. تشکیل محلول جامد هنگامی میسر است که اختلاف شعاع اتمی دو عنصر کمتر از 0/15 باشد. اگر اختلاف شعاع اتمی بیش از 0/15 باشد، تشکیل محلول جامد بسیار محدود است [26]. شعاع اتمی نقره 172 pm، آهن 156 pm و تیتانیم 215 pm است. با توجه به شرایط تشکیل محلول جامد اختلاف ناچیز شعاع اتمی نقره و آهن(0/09)، 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

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]



eZAF Smart Quant Results

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

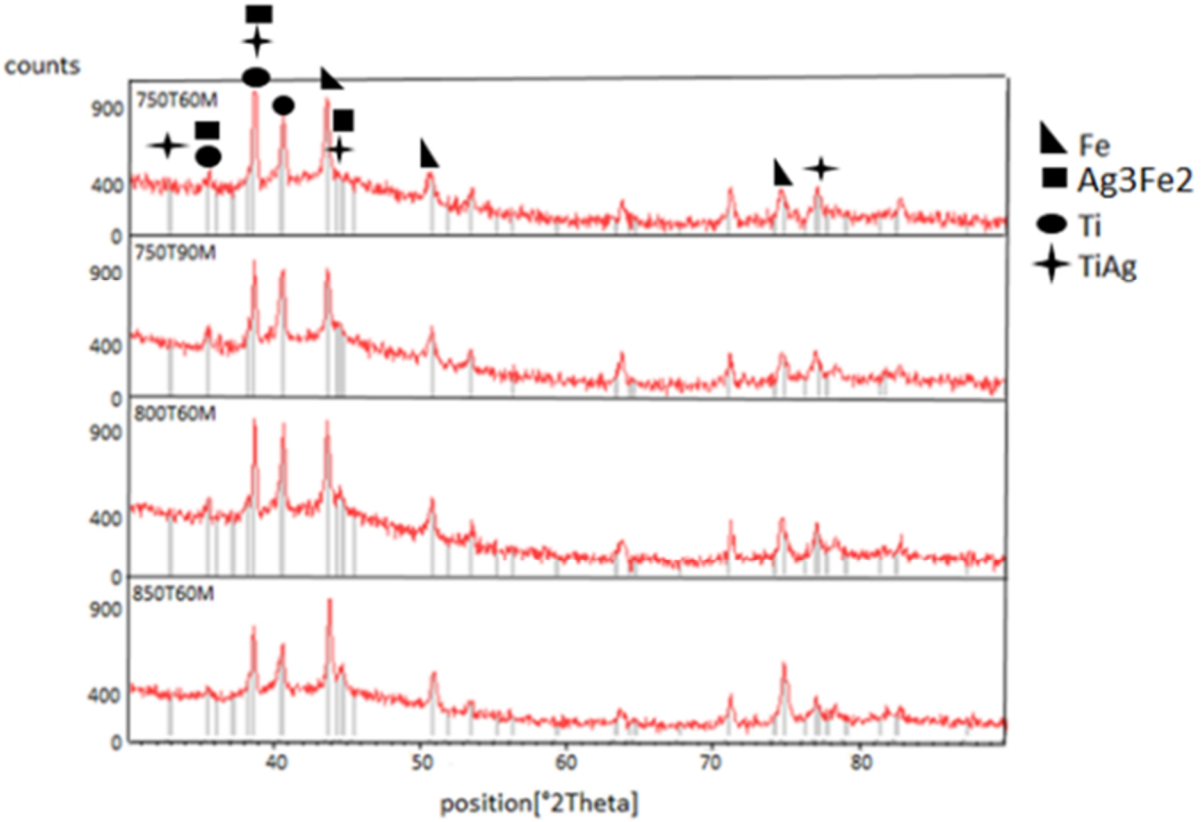


شکل11-تصویر آزمون EDS نمونه 850T60M در منطقه ی اتصال

محلول جامد نقره در تیتانیم بسیار ناچیز خواهد بود و بیشتر به صورت ترکیبات بین فلزی تشکیل می‌شوند.

به منظور بررسی دقیق تر نمونه‌ها 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 71/14 کاهش یافته است. از طرفی درصد وزنی تیتانیم از8/63 به 17/8 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 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 می‌شود در دمای 750 درجه سانتی گراد و زمان 60 دقیقه فازهای موجود عبارتند از Fe و Ti. 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 Ag_3Fe_2 وTiAg تشکیل می‌شود و فازهای موجود Fe، Ti، Ag_3Fe_2 و TiAg هستند. با افزایش دما به 850 درجه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]



شکل12-الگوی پراش پرتوی ایکس نمونه های اتصال یافته

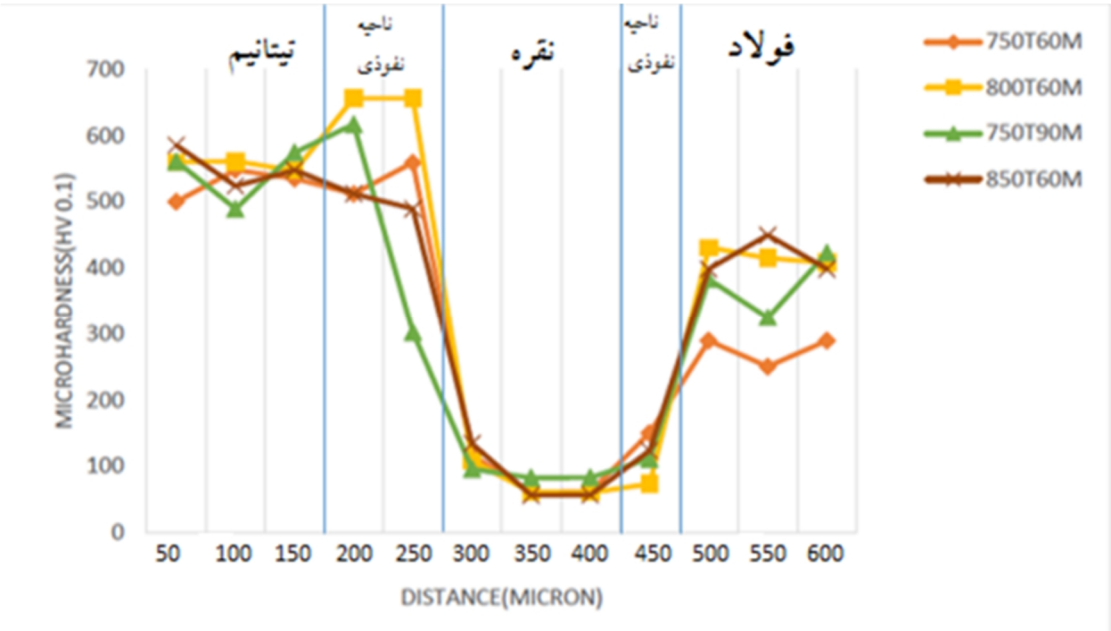
سانتی‌گراد، شدت برخی از پیک‌ها کاهش یافته است دلیل آن را می توان به کاهش درصد وزنی نقره در دماهای بالا در سطح اتصال نسبت داد. لازم به ذکر است در نرم افزار X'Pert کد مرجع فازهای Fe، Ti، Ag_3Fe_2 و TiAg به ترتیب 23298، 11198، 491287 و 60560 است. کاندا و همکارانش [27] در پژوهش خود که در آن اتصال نفوذی بین 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 کردند که وجود ترکیب بین فلزی TiAg باعث افزایش سختی در نمونه‌ها می‌شود. در تحقیق دیگری، زارانیک و همکارانش [29] ساختار و خواص آلیاژهای تولید شده از تیتانیم و نقره به روش متالوژی پودر را مورد بررسی قرار دادند. آنها 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. آنها اتصال نفودی فولاد فریتی با تیتانیم را بدون استفاده از میان لایه مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند ترکیبات بین‌فلزی FeTi و Fe_2Ti بعد از اتصال در فصل مشترک اتصال به وجود آمدند.

3-2-خواص مکانیکی

پروفیل میکروسختی تهیه شده از نمونه‌ها در شکل (13) ارایه شده است. همان گونه که انتظار می‌رفت سختی در فصل مشترک نقره- تیتانیم در همه نمونه‌ها نسبت به بقیه قسمت‌های

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]



شکل 13-پروفیل میکروسختی نمونه های اتصال یافته

نمونه دارای مقدار بیشینه است که علت آن حضور ترکیب بین‌فلزی TiAg در فصل مشترک است و نمونه‌ی 800T60M دارای بیش‌ترین مقدار سختی در فصل مشترک نقره-تیتانیم است. برای همه نمونه‌ها با فاصله گرفتن از فصل مشترک میزان سختی در دو طرف فصل مشترک کاهش می‌یابد و کمترین سختی مربوط به نقره است. به عبارت دیگر ضعیف‌ترین بخش اتصال مربوط به نقره می‌باشد. در ناحیه‌ی نفوذی در فصل مشترک تیتانیم نقره نمونه‌ی 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 ویکرز) است. دلیل این امر را می توان رشد بیش از اندازه دانه‌های آن در اثر افزایش دما دانست. به طور کلی می‌توان گفت سختی با افزایش دما، به دلیل تشکیل ترکیبات بین‌فلزی افزایش می‌یابد. 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 ولی سختی نسبت به نقره اندکی بیشتر است که می‌توان دلیل آن را تشکیل مقدار اندک ترکیب بین فلزی Fe_3Ag_2 دانست. ژانگ و همکارانش [31] در تحقیقی که درباره ی ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال نفوذی فولاد و تنگستن با میان لایه تیتانیم انجام داده‌اند شاهد افزایش سختی در ناحیه‌ی نفوذی بودند. آن‌ها دلیل افزایش سختی در فصل مشترک اتصال را تشکیل محلول جامد و شکل گیری ترکیبات بین‌فلزی در این ناحیه دانسته‌اند. این محققین در تحقیق دیگری که در آن اتصال نفودی تنگستن و فولاد با میان لایه‌ی نیکل را مورد بررسی قرار دادند نیز به این نتیجه دست یافتند که سختی در منطقه‌ی اتصال به دلیل به وجود آمدن ترکیبات بین‌فلزی، بیشتر از سایر قسمت‌هاست. 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 منطقه‌ی اتصال، به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین بیان کردند با افزایش دما از 650 به 800 درجه ی سانتی‌گراد سختی در منطقه‌ی اتصال افزایش می‌یابد.

3-3-استحکام برشی

استحکام برشی نمونه‌های اتصال یافته در جدول (5) آورده شده است. در این بررسی نمونه‌ی 850T60M بیش‌ترین و نمونه 750T90M کمترین میزان استحکام برشی را داشته است، از

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]

سوی دیگر شکست در همه‌ی نمونه‌ها از سمت اتصال فولاد-نقره بوده است. با توجه به جدول، دما و زمان اتصال بر روی استحکام برشی نمونه‌های اتصال یافته تاثیر دارد به این ترتیب که در دمای 750 درجه‌ی سانتی‌گراد و زمان 60 دقیقه استحکام برشی نمونه 56 مگاپاسکال است و هنگامی که در همین دما زمان اتصال به 90 دقیقه افزایش می‌یابد استحکام برشی نمونه به 32 مگاپاسکال کاهش می‌یابد. 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 درجه و زمان 90 دقیقه است. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت استحکام برشی با افزایش دما به دلیل تشکیل ترکیب بین‌فلزی TiAg افزایش می‌یابد. همچنین زمان‌های بیشتر از 60 دقیقه استحکام برشی نمونه‌ها را به دلیل بزرگ شدن بیش از حد اندازه دانه و همچنین تغییر شکل پلاستیک ناحیه‌ی اتصال کاهش می‌دهد. ژانگ و همکارانش [31] نیز در پژوهش خود با افزایش دما ابتدا شاهد افزایش استحکام و سپس کاهش آن بود. وی دلیل این کاهش استحکام برشی را تغییر شکل پلاستیک در منطقه‌ی اتصال عنوان کرده است. همچنین دلیل استحکام پایین نمونه‌های اتصال یافته در دماهای کم را عدم نفوذ کامل در یکدیگر بیان کرده است. کورت و همکارانش [30] نیز در تحقیق خود که در آن اتصال نفوذی بین تیتانیم گرید 5 و فولاد زنگ نزن فریتی بدون استفاده از میان لایه را مورد بررسی قرار دادند به این نتیجه دست یافتند که استحکام برشی نمونه‌ها با افزایش دما تا 850 درجه ی سانتی گراد افزایش یافت. در تحقیق دنگ و همکارانش [19] در زمینه‌ی اتصال نفوذی فولاد و تیتانیم، استحکام نمونه‌ها را در سه دمای 825، 850 و 875 درجه ی سانتی‌گراد 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 با افزایش دما افزایش می‌یابد و در دماهای بیش تر از 850 درجه سانتی گراد استحکام نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در پژوهش 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-نتیجه گیری

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

1. در بین نمونه‌های جوشکاری شده نمونه‌های اتصال یافته در شرایط 60min - 750°C، 90min - 750°C، 60min - 800°C، 60min - 850°C دارای اتصال بهتری نسبت به بقیه نمونه‌ها بودند.

2. 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 پایین‌تر 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 سانتی‌گراد، 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 سانتی‌گراد Fe، و Ti است و با افزایش دما به 800 درجه‌ی سانتی‌گراد

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]

علاوه بر فازهای Fe، Ti فازهای TiAg و Fe_3Ag_2 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 بین‌فلزی 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 می‌یابد. همچنین زمان‌های بیشتر از 60 دقیقه استحکام برشی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. استحکام برشی نمونه‌ی 850T60M مقدار بیشینه است.

منابع

[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.

[6] ثابت ح.، عبدی ف.، قنبری حقیقی م.، "اتصال فولاد زنگ نزن 316 Lبه تیتانیم خالص تجاری با لایه واسط مس خالص"، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره 1، بهار و تابستان 1399، صفحه 95-81.

[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.

[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

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]

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",

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-01-27]