

بررسی پارامترهای مؤثر در لحیم کاری سخت با اشعه مادون قرمز اتصال غیر همجنس Ti-۶Al-۴V و ۳۱۶L با استفاده از فلز پرکننده پایه نقره

اسماعیل گنجه^۱، محمد قاسم زاده^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۲، ش ص: ۱۶-۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹)

چکیده

لحیم کاری مادون قرمز یک فرآیند ویژه است که می‌تواند تا نرخ $500^\circ\text{C}/\text{min}$ بر دقیقه حرارت دهی کند. این میزان حرارت دهی می‌تواند از فرسایش زیرلایه و رشد اضافی فازهای بین فلزی در منطقه اتصال به طور چشمگیری بکاهد. در این تحقیق لحیم کاری مادون قرمز اتصال Ti-۶Al-۴V و ۳۱۶L انجام و اثر پارامترهای لحیم کاری (دما و زمان) بر ریزساختار اتصال و آلیاژهای پایه توسط فلز پرکننده پایه نقره، بررسی شد. لحیم کاری در کوره مادون قرمز و در دمای 750°C ، 780°C ، 800°C و 850°C برای ۳ تا ۵ دقیقه برای فلز پرکننده پایه نقره انجام شد. کیفیت ریزساختار اتصال و توزیع فازها توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی مجهز به طیف سنجی توزیع انرژی بررسی شد. مشاهدات ریز ساختاری، ۴ منطقه شامل عناصر Fe و Cr، منطقه شامل ترکیبات بین فلزی پایه CuTi، در مرکز اتصال منطقه غنی از Ag است. این امر به این دلیل است که با نفوذ Ti به سمت مرکز اتصال و قابلیت بالای ایجاد ترکیبات بین فلزی پایه CuTi، مقدار زیادی از Cu داخل فلز پرکننده با Ti ترکیب می‌شود. از طرفی میل ترکیبی Ag با Ti بالا نیست. به طوری که حد حلالیت Ag در Ti ناچیز است. بنابراین مقدار زیادی Ag به سمت مرکز اتصال پس زده می‌شود. این مقدار به صورت محلول غنی از Ag به همراه درصدهای کم فازهای بین فلزی پایه CuTi در منطقه اتصال باقی می‌ماند از نتایج آزمون ریزسختی ویکرز، برای تأیید نتایج آزمون‌های قبلی استفاده شد. بهترین پارامترهای لحیم کاری سخت در محدوده پارامترهای مورد بررسی، در دمای 850°C و زمان ۵ دقیقه برای فلز پرکننده پایه نقره به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ تیتانیوم، فولاد زنگ نزن، لحیم کاری سخت مادون قرمز، ریزساختار، فلز پرکننده نقره.

^۱ - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران

^۲ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشجوی کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد

*-نویسنده مسئول مقاله: navidganjehie@yahoo.com

پیشگفتار

فولاد زنگ نزن Ti-6Al-4V و آلیاژ آلفا-بتای Ti-6Al-4V هر دو از معروفترین آلیاژهای مهندسی هستند. از مهمترین مشخصات آنها، می‌توان از خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی بالای آنها نام برد. کاربردهای این اتصال در صنایع ورزشی [۱]، هسته‌ای [۲]، هوافضا، حمل و نقل، تولید برق و صنایع شیمیایی [۳] معرفی شده است. برای اتصال این دو آلیاژ به هم، روش‌های جوشکاری و لحیم کاری سخت پیشنهاد شده است. روش جوشکاری به دلیل تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی، فازهای ترد ایجاد شده، کاهش مقاومت به خوردگی، عدم حلالیت کافی در هم، کاهش چقرمگی در دمای پایین و وقوع ترک انجمادی، روشی مناسب به منظور دستیابی به کیفیت مطلوب نیست [۴]. از طرفی روش لحیم کاری از قدیمی‌ترین روش‌های مؤثر برای اتصالات غیر همجنس است. در گذشته، جنبه‌های عملی این فرآیند به دلیل کاربرد سنتی آن در اتصال جواهرات و ظروف آشپزخانه بیشتر از جنبه‌های علمی مورد توجه بوده است. اما امروزه کاربردهای آن در زمینه‌های علمی و صنعتی نظیر هوافضا، صنایع دریایی و ماشین سازی پیشرفت داشته است و در بسیاری موارد می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش جوشکاری باشد. در لحیم کاری سخت از یک فلز مذاب به عنوان پرکننده بین دو سطح استفاده می‌شود تا با ایجاد پیوند بین اجزای اتصال، کیفیت مکانیکی آن تضمین شود. لحیم کاری به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود. اگر دمای لیکوئیدوس فلز پرکننده تا 450°C باشد، لحیم کاری نرم و اگر بیشتر از آن باشد، لحیم کاری سخت نامیده می‌شود [۵].

در میان روش‌های معمول لحیم کاری سخت، روش‌های کوره‌ای کاربرد فراوان دارند. مشکل بزرگ این فرآیند سرعت‌های پائین حرارت دهی آن است. در این روش، نرخ حرارت دهی بین 10°C تا نهایتاً 30°C بر دقیقه است. این نرخ حرارت دهی در لحیم کاری سخت آلیاژهای غیرهمجنس می‌تواند باعث رشد اضافی فازهای بین فلزی و در نتیجه کاهش استحکام باشد. به همین دلیل امروزه برای این نوع اتصالات، روش‌های پیشرفته‌تر با نرخ‌های حرارت دهی بالاتر پیشنهاد می‌شود. روش لحیم کاری سخت مادون قرمز با نرخ‌های حرارت دهی بالا (تا 3000°C بر دقیقه) می‌تواند این مشکل را برطرف کند. برای اتصال آلیاژهای تیتانیوم و فولاد زنگ نزن به هم فلزات پرکننده پایه نقره، پایه تیتانیوم، پایه زیرکونیوم،

پایه نیکل و پایه مس در شرایط گاز خنثی یا خلاء توصیه شده است [۶].

کوره‌های مادون قرمز نوعی از کوره‌های حرارتی هستند که توسط لامپ‌های مادون قرمز کار می‌کنند. در این لامپ‌ها، الکتروود تنگستنی وجود دارد که پس در اثر عبور جریان الکتریکی می‌تواند از خود امواج مادون قرمز ساطع کند. از این خاصیت استفاده‌های زیادی در صنعت شده است. از چراغ‌های روشنایی تا کوره‌های پخت مواد غذایی و گرم کن‌های خانگی می‌توانند به همین روش تولید گرما کنند. میزان گرمایش این کوره‌ها بستگی به میزان توان الکتریکی لامپ‌های تولید امواج مادون قرمز دارد. در مصارف صنعتی، کوره‌های مادون قرمز می‌توانند توانی معادل ۱ تا ۱۸ کیلووات انرژی الکتریکی را به حرارت تبدیل کنند. بنابراین دمایی بین 450°C تا 1700°C ایجاد می‌کنند [۷].

از تکنولوژی مادون قرمز برای اتصال فلزات دیگری هم استفاده گردیده است و نتایج بسیار مناسبی در اتصال نسبت به سایر روش‌ها مشاهده شده است. Ren-Kae و همکاران [۸] از لحیم کاری مادون قرمز برای اتصال دهی آلیاژ حافظه دار $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$ و آلیاژ اینکونل ۶۰۰ استفاده کرده‌اند و واکنش‌های بین‌فازی، ریزساختار و استحکام برشی اتصالات در حالت‌های مختلف لحیم کاری مورد ارزیابی قرار دادند. در پژوهشی دیگر Ren-Kae و همکاران از لحیم کاری مادون قرمز برای اتصال آلیاژ حافظه دار $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$ و فولاد زنگ نزن Ti-6Al-4V استفاده کردند [۹]. در بررسی نتایج حاصل از آزمایشات اتصالات لحیم کاری حاوی $50\ \mu\text{m}$ میکرومتر Cu دارای بالاترین میانگین استحکام برشی $354\ \text{MPa}$ و $349\ \text{MPa}$ به ترتیب در دماهای 820°C و 850°C بودند.

نوآوری این پژوهش که آن را با سایر پژوهش‌های پیرامون این حوزه متمایز می‌سازد استفاده از اولین کوره مادون قرمز ساخته شده در ایران برای انجام عملیات لحیم کاری جهت ایجاد اتصال غیر هم جنس مورد نظر است. مزیت اصلی کوره‌های مادون قرمز سرعت بالای گرمایش و سرمایش آن در مقایسه با کوره‌های دیگر است. به طوری که می‌توانند با نرخ 100 تا $3000\ (\frac{^\circ\text{C}}{\text{min}})$ سرعت گرمایش و سرمایش داشته باشند. این در حالی است که کوره‌های معمولی آزمایشگاهی و صنعتی تنها 10 تا $30\ (\frac{^\circ\text{C}}{\text{min}})$ سرعت گرمایش و سرمایش دارند. همین امر باعث صرفه جویی در هزینه و زمان خواهد شد. به علت بالا

در این تحقیق از فلز پرکننده پایه نقره (۳۴ CBS یا DIN ۸۵۱۳) با ضخامت ۵۰ میکرون استفاده شد.

شرایط لحیم کاری با کوره مادون قرمز

در ابتدا سطوح فلزات پایه با استفاده از کاغذ سنباده تا شماره ۶۰۰ سنباده شدند تا اکسیدهای سطحی از بین بروند. این کار به افزایش خاصیت ترکندگی فلزات پرکننده می‌افزاید. سپس نمونه‌های فلز پایه و آلیاژهای پرکننده در محلول استون در دستگاه آلتراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه شستشو شدند. بعد از تمیزکاری، آلیاژهای پرکننده در محل اتصال قرار گرفته و محل اتصال توسط یک گیره نگهدارنده ثابت شد و به دقت درون کوره قرار گرفت. ترموکوپل در داخل گیره نگهدارنده و مماس به محل اتصال قرار گرفت تا دمای دقیق اتصال را نشان دهد. نمونه‌ها کاملاً روی هم و فلز پرکننده در میان آنها قرار گرفت. در شکل ۱ تصویر کوره مادون قرمز مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است.

در ابتدا کوره به مدت ۱۵ دقیقه توسط پمپ مکانیکی خلاء شد. سپس گاز آرگون به صورت دینامیک به حدی داخل محفظه کوارتز دمیده شد تا میزان فشار داخل آن به ۱/۵ psi (۱۰۰ mbar) برسد. در تمام طول فرایند فشار گاز آرگون بین ۵۰ mbar تا ۱۰۰ mbar ثابت نگه داشته شد.

سپس کوره شروع به فعالیت کرد و طبق سیکل حرارتی نشان داده شده در شکل ۱، نمونه‌ها دما دهی شدند. دمای نمونه‌ها با نرخ $\frac{C}{min} 100$ تا دمای $600^{\circ}C$ بالا رفت و سپس در این دما برای مدت ۱۰ دقیقه پیش گرم شد. سپس تا دمای لحیم‌کاری با نرخ $\frac{C}{min} 100$ مجدداً حرارت دهی شد و پس از اتمام زمان، تا دمای محیط با نرخ $\frac{C}{min} 100$ داخل کوره خنک شد. البته چانگ و همکاران [۱۳] سرعت حرارتی دهی کوره مادون قرمز خود را $\frac{C}{min} 600$ و شیو و همکاران [۱۴] هم این مقدار را $\frac{C}{min} 900$ تنظیم کرده‌اند.

آزمایش‌ها برای فلز پرکننده پایه نقره در دماهای $750^{\circ}C$ ، $780^{\circ}C$ ، $800^{\circ}C$ ، $850^{\circ}C$ و $900^{\circ}C$ و زمان‌های ۳ و ۵ دقیقه انجام شد.

بودن سرعت تولید، میزان اکسیداسیون قطعات نیز به شدت کاهش می‌یابد [۱۰، ۱۱].

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، بررسی متالورژیکی و آزمایش ریزسختی، برای اتصال فولاد زنگ نزن ۳۱۶L و آلیاژ تیتانیوم Ti-۶Al-۴V ایجاد شده، به روش لحیم‌کاری سخت مادون قرمز، انجام شد تا دما و زمان مناسب برای لحیم‌کاری سخت مادون قرمز این دو آلیاژ به دست آید. این آزمایش با استفاده از فلز پرکننده پایه نقره در کوره مادون قرمز که برای اولین بار در ایران ساخته شد و به ثبت رسید، انجام شد. در این تحقیق ابتدا آزمایش‌های اتصال انجام شد تا دما و زمان مناسب اتصال به دست آید. سپس نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی تحت بررسی متالورژیکی قرار گرفت تا ریزساختار و شرایط بهینه به دست آید. سپس آزمایش ریزسختی انجام شد. با بررسی نهایی همه موارد فوق سیکل مناسب لحیم‌کاری مادون قرمز به دست آمد.

مواد مصرفی

ورق مورد استفاده در این تحقیق، ورق آلیاژ ۴V-Ti-۶Al به ضخامت ۱،۵ میلی متر بود. نمونه‌های لحیم‌کاری طبق استاندارد ژاپن IS Z 3192 [۱۲] و به روش واترجت^۲ بریده شدند. همچنین نمونه‌هایی به ابعاد $15 \times 10 \text{ mm}^2$ و ضخامت ۱/۵ mm برای بررسی ریزساختار اتصال تهیه شدند. ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti-۶Al-۴V به دست آمده از نتایج کوانتومتری در جدول ۱ و خواص مکانیکی آن در **Error! Reference source not found.** آمده است. ورق دیگر مورد استفاده در این تحقیق، ورق فولاد زنگ نزن ۳۱۶L به ضخامت ۱/۵ میلی متر بود. این نمونه‌ها هم، مطابق استاندارد ژاپن JIS Z 3192 [۱۲] و به کمک واترجت بریده شدند. همچنین نمونه‌هایی به ابعاد $15 \times 10 \text{ mm}^2$ برای بررسی ریزساختار اتصال تهیه شدند. ترکیب شیمیایی آلیاژ ۳۱۶L به دست آمده از نتایج کوانتومتری در جدول ۱ و خواص مکانیکی آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti-۶Al-۴V و فولاد ۳۱۶L (برحسب درصد وزنی)

C	Mo	Cr	Ni	Mn	Fe	V	Al	Ti	آلیاژ پایه
-	-	-	-	-	-	۳٫۷۰	۶٫۲۵	باقی مانده	Ti-۶Al-۴V
۰٫۰۳	۱٫۳۶	۱۶٫۲	۱۰٫۴	۲	باقی مانده	-	-	-	۳۱۶L

جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژ Ti-۶Al-۴V و فولاد ۳۱۶L

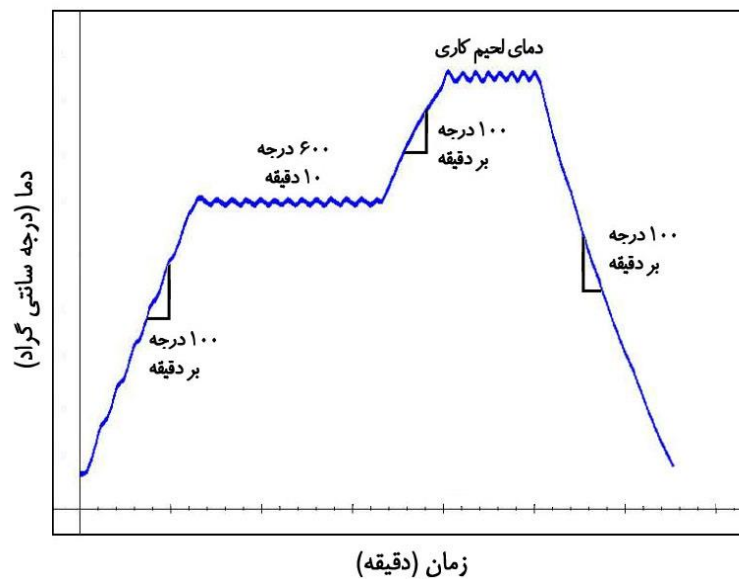
استحکام کششی (MPa)	سختی (HV)	آلیاژ پایه
۹۹۸	۳۰۹	Ti-۶Al-۴V
۵۲۵	۱۶۰	۳۱۶L

جدول ۳- ترکیب شیمیایی فلز پرکننده پایه نقره (CBS۳۴ یا DIN ۸۵۱۳) و دمای لیکوئیدوس و سالییدوس آن [۱۰]

CBS ۳۴ (برحسب درصد وزنی)					
Ag	Cu	Zn	Cd	T _s (°C)	T _l (°C)
۳۳٫۶	۲۰٫۴	۲۲٫۳	۲۳٫۷	۶۱۰	۶۸۰



شکل ۱- نمایش کوره مادون قرمز رومیزی مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۲- سیکل حرارت دهی نمونه‌ها طی فرایند لحیم کاری سخت

مشاهدات ریزساختاری

بررسی ریزساختاری قرار گرفت. در ادامه، نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی در حالت الکترون‌های برگشتی و آنالیز EDS برای بدست آوردن درصد اتمی هر عنصر در نقاط مشخص مورد بررسی قرار گرفت.

پس از اتمام فرایند لحیم کاری، نمونه‌های اتصال، تحت عملیات سنباده زنی و پولیش قرار گرفتند و سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل IMI-420 نمونه‌های آماده شده در محلول اچ (۲ ml HF + ۲۰ ml HNO₃ + ۸۰ ml Ethanol برای آلیاژ پایه تیتانیوم و ۰/۱ g CuCl₃ + ۱۰ ml HNO₃ + ۵ ml HCl برای آلیاژ ۳۱۶L) (۱۵) تحت

آزمون‌های مکانیکی

آزمون ریزسختی ویکرز تحت بار ۱۰۰ گرم انجام گرفت. از هر نمونه همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، آزمون سختی از نواحی متفاوت و همین‌طور فازهای مختلف در مرکز اتصال گرفته شد.

آزمون کشش بر روی نمونه‌های برشی انجام گردید و استحکام برشی فلز پرکننده برابر $164/2 \text{ Mpa}$ و ازدیاد طول $5/6$ درصد حاصل گردید.

نتایج و بحث

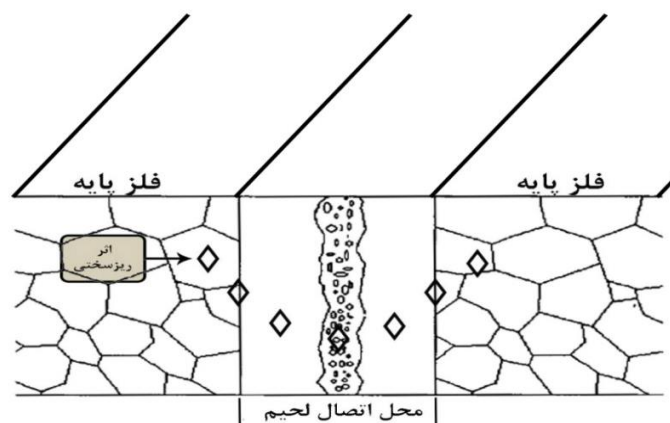
فلز پرکننده پایه Ag مورد استفاده در این تحقیق دارای مقادیری Cu، Zn و Cd است. حضور این عناصر در این فلز پرکننده باعث کاهش دمای ذوب آن تا 680°C شد که نسبت به فلزات پرکننده مرسوم خانواده BAG پایین‌تر است. دلیل استفاده از این فلز پرکننده این است که اولاً فلزات پرکننده پایه Ag، عمومی‌ترین فلزات پرکننده لحیم کاری سخت آلیاژهای پایه Ti و خانواده فولادهای زنگ نزن هستند. همچنین این فلزات پرکننده می‌توانند چقرمگی خوب و استحکام اتصال در دمای اتاق را تضمین کنند. از طرفی دمای لحیم کاری این فلزات پرکننده پایین‌تر است. عیب بزرگ این فلزات پرکننده استحکام‌های کم در دمای بالا و مقاومت به خوردگی ضعیف آن است.

بررسی کیفیت اتصال

طبق نتایج به دست آمده از آزمون بررسی کیفیت اتصال که در جدول ۴ آمده است، در نمونه‌های دمای 750°C و 780°C و زمان‌های ۳ و ۵ دقیقه اتصال به شکل مناسب ایجاد نشد. بنابراین نمونه‌های این دما و زمان رد شدند. علت این امر به وجود عناصر با دمای جوش پایین مثل Cd بر می‌گردد. این عناصر در دمای پایین ذوب و بخار می‌شوند و چون فرآیند لحیم کاری مادون قرمز هم یک فرآیند سریع است، فرصت خروج این گازها در نمونه ایجاد نمی‌شود. بنابراین سطح این نمونه‌ها متخلخل به نظر می‌رسد. از طرفی به دلیل دمای پایین و زمان ناکافی، فلز پرکننده به طور کامل ذوب نشده و نتوانسته سطح اتصال را به طور مناسب‌تر کند.

مشاهدات ریزساختاری اتصال

شکل ۴ تصویرهای حاصل از مشاهده نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری برای فلز پرکننده پایه Ag را در دما و زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴ (الف) دیده می‌شود، روی سطح نمونه لحیم کاری شده در دمای 800°C و زمان ۵ دقیقه، حفرات ریزی ایجاد شده که به دلیل خروج گازهای حاصل از تبخیر Cd داخل فلز پرکننده در هنگام سرد شدن هستند. همانطور که اشاره شد، Cd عنصر با دمای جوش پایین (767°C) است. بنابراین Cd به طور کامل بخار شده و از سطح اتصال خارج می‌شود. نمونه لحیم شده در این شرایط به دلیل ناکافی بودن دما و زمان ریزساختار مطلوبی نداشت. بنابراین دما و زمان برای آزمایش‌های بعدی افزایش یافت.



شکل ۳- شماتیک آزمون سختی از مناطق مختلف اتصال

جدول ۴- نتایج نمونه‌های اتصال یافته با فلز پرکننده پایه Ag در دما و زمان‌های مختلف

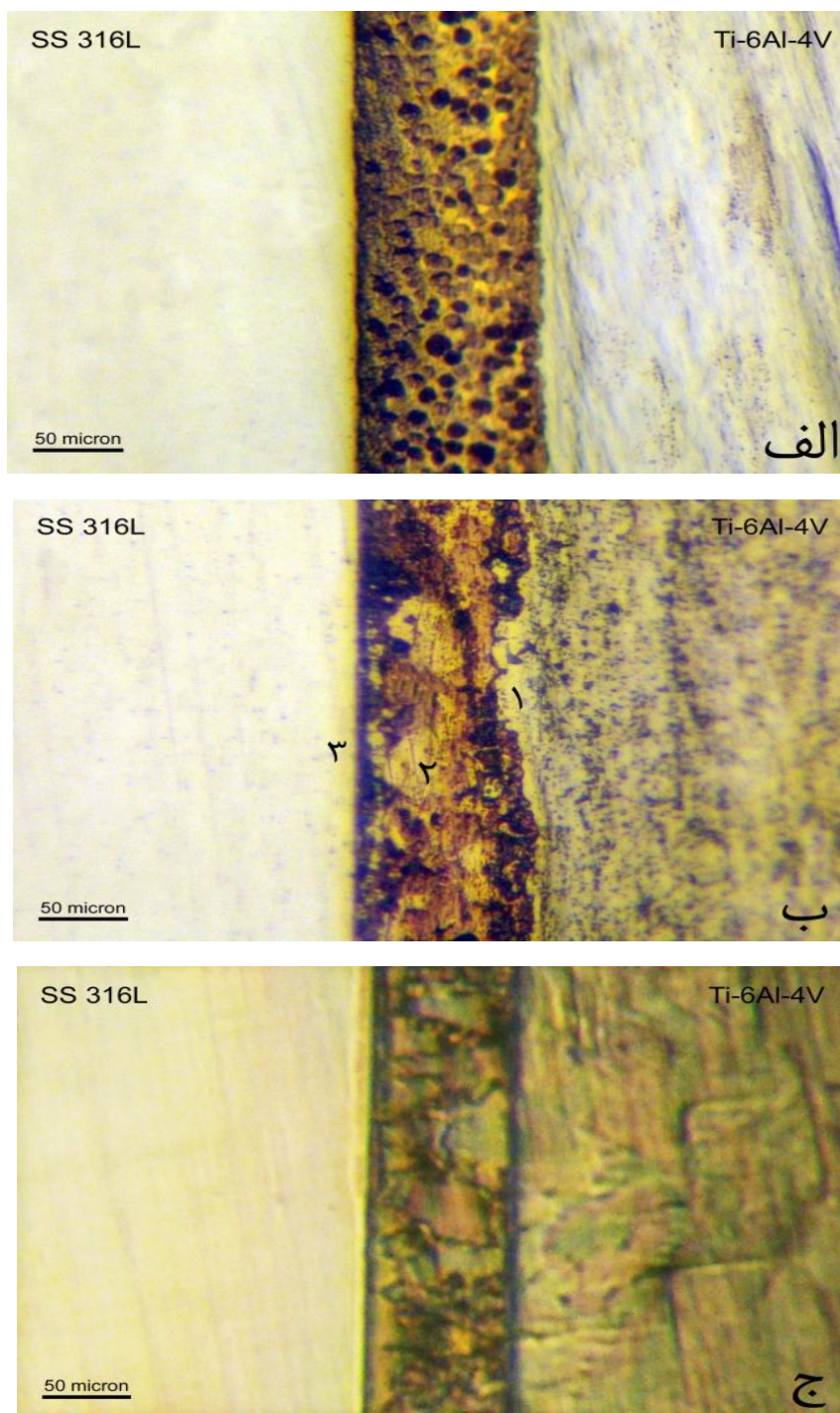
ردیف	شرایط (دما °C و زمان (min)	نتیجه
۱	Ag-۷۵۰-۳	رد
۲	Ag-۷۵۰-۵	رد
۳	Ag-۷۸۰-۳	رد
۴	Ag-۷۸۰-۵	رد
۵	Ag-۸۰۰-۳	قبول
۶	Ag-۸۰۰-۵	قبول
۷	Ag-۸۵۰-۳	قبول
۸	Ag-۸۵۰-۵	قبول
۹	Ag-۹۰۰-۳	قبول
۱۰	Ag-۹۰۰-۵	قبول

ترکندگی و همانطور میزان نفوذ بیشتر، عرض منطقه دوم کمتر می‌شود. بنابراین ساختار یکنواخت‌تر، در اثر تشکیل ترکیبات واکنشی ایجاد می‌شود. از طرفی لایه واکنشی سمت آلیاژ Ti-۶Al-۴V همواره از لایه واکنشی سمت ۳۱۶L پهن‌تر است. برای مطالعه دقیق‌تر از مقطع اتصال، نتایج آزمون SEM بررسی شد. در شکل ۴ تصویر حاصل از نمونه لحیم شده در دمای °C ۸۰۰ و زمان ۵ دقیقه نشان داده شده است.

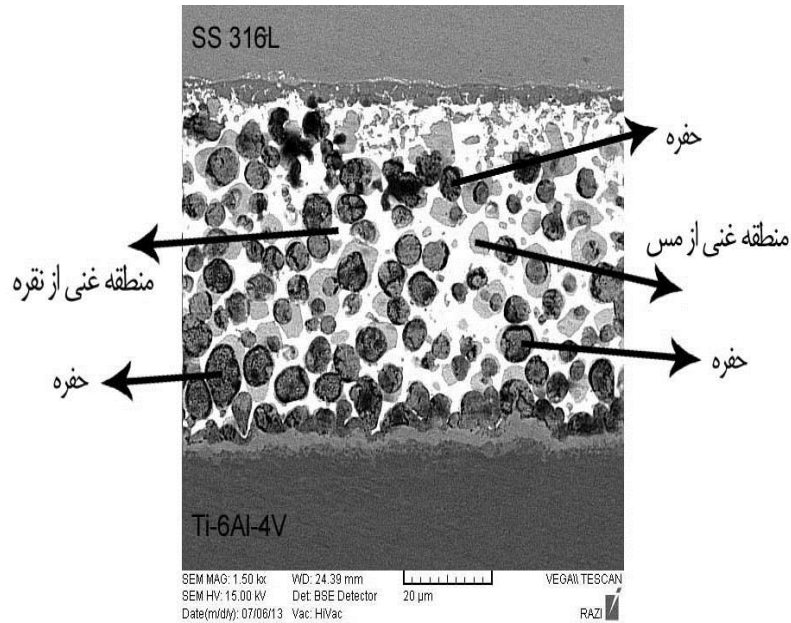
در شکل ۵ همانطور که مشاهده می‌شود، در مرکز اتصال حفراتی دیده می‌شود (مناطق سیاه رنگ) که این امر به دلیل خروج گازهای حاصل از تبخیر Cd است. مناطق سفید رنگ، مناطق غنی از نقره هستند که به دلیل خروج Cu و Zn از داخل فلز پرکننده و نفوذ به سمت دو آلیاژ پایه در دو طرف ایجاد شده‌اند. مناطق طوسی رنگ هم مناطق فازهای بین فلزی غنی از Cu هستند. از طرفی میزان نفوذ در دو طرف آلیاژهای پایه ناکافی به نظر می‌رسد، بنابراین دما برای نمونه‌های بعدی افزایش یافت.

با افزایش دما از °C ۸۰۰ به °C ۸۵۰ شکل ۴ (ب) حفره‌ها از بین می‌روند. این امر به جریان یافتن فلز پرکننده و افزایش سیالیت و ترکندگی فلز پرکننده پایه Ag بر می‌گردد. در واقع مذاب تشکیل شده در دماهای بالاتر جای حفرات را پر می‌کند و همزمان با افزایش ترکندگی و سیالیت، با افزایش دما و زمان (۳ دقیقه به ۵ دقیقه)، ضخامت لایه واکنشی در دو سمت هم بیشتر می‌شود. این امر مطابق معادلات نفوذ وابسته به دماست. با افزایش دما، نفوذ بیشتر صورت می‌گیرد و همانطور که در شکل ۴ (ب) دیده می‌شود، Ti به دلیل نفوذ بهتر و بیشتر در فلز پرکننده مذاب، بیشتر به سمت مرکز اتصال حرکت می‌کند. در واقع Ti بیشتری از زیرلایه Ti-۶Al-۴V نسبت به عناصر آلیاژی ۳۱۶L، حل می‌شود. بنابراین ضخامت لایه واکنشی در سمت Ti-۶Al-۴V بیشتر است. نمونه اتصال یافته در دمای °C ۹۰۰ هم در شکل ۴ (ج) دیده می‌شود.

به طور کلی منطقه اتصال شامل سه ناحیه ریزساختاری است. همانطور که در شکل ۴ (ب) دیده می‌شود، منطقه اول و سوم در مجاورت فلزات پایه و منطقه دوم در مرکز اتصال تشکیل شده است. در دماهای کمتر ناحیه دوم (در مرکز اتصال) وسعت بیشتری دارد اما هرچقدر دما بالاتر می‌رود، به دلیل سیالیت بیشتر و



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های لحیم کاری شده با فلز پرکننده پایه Ag با پارامترهای مختلف (الف) دمای 800°C و زمان 5 دقیقه (ب) دمای 850°C و زمان 5 دقیقه (ج) دمای 900°C و زمان 5 دقیقه



شکل ۵- تصویر SEM از مقطع اتصال نمونه لحیم کاری شده در دمای 800°C و زمان ۵ دقیقه

علت عدم مشاهده ترکیبات AgTi انحلال کم نقره در تیتانیوم ذکر شده است در حالی که در مرکز اتصال انحلال تیتانیوم در نقره مهم است که طبق نمودار کمی وجود دارد. این مقدار به صورت محلول غنی از Ag به همراه درصدی کم فازهای بین فلزی پایه CuTi در منطقه ۳ اتصال باقی می ماند (در جدول ۵ میزان نفوذ عناصر Ag و Cu در Ti آمده است). منطقه ۴ هم با وجود عناصر V و Cu که پایدارکننده فاز β هستند، منطقه β - Ti می باشد. نکته دیگر این است که با افزایش دما میزان نفوذ بیشتر می شود. این به این معنی است که در اثر افزایش زمان و میزان نفوذ بیشتر Ti در منطقه اتصال، منطقه ۲ و ۴ ضخامت بیشتری پیدا می کند و طول منطقه ۳ کمتر می شود.

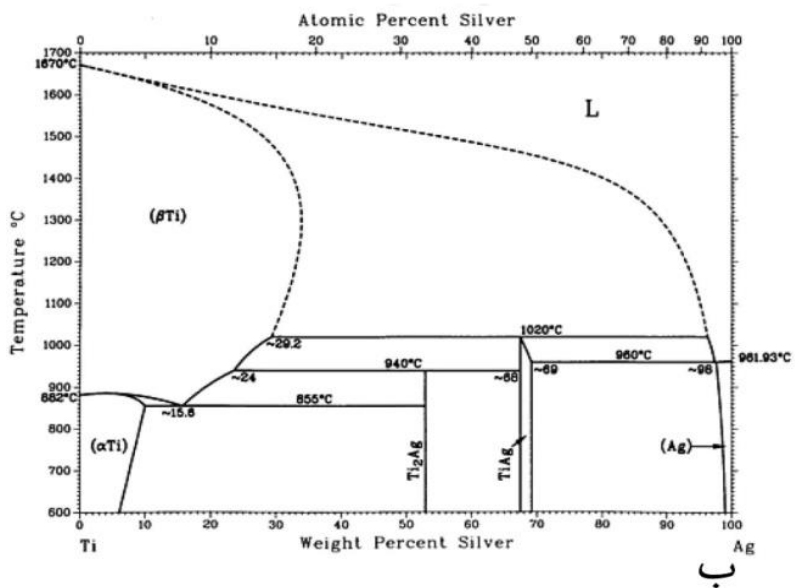
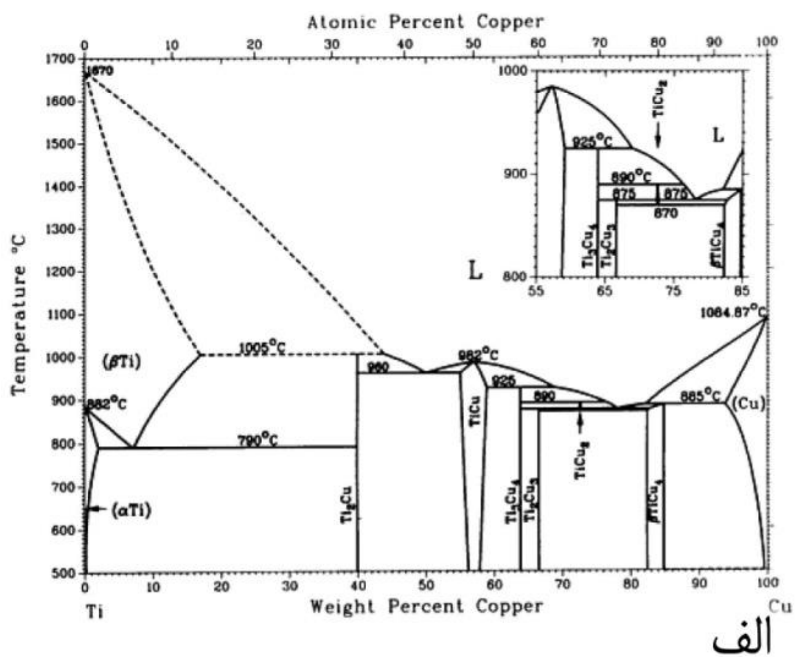
تصویر SEM حاصل از نمونه لحیم کاری شده در دمای 850°C و زمان ۵ دقیقه به همراه مناطق مختلف آن در شکل ۶ آمده است. مطابق آنچه که در تصاویر دیده می شود، منطقه ۱، شامل عناصر Fe و Cr است. منطقه ۲، شامل ترکیبات بین فلزی پایه CuTi است. منطقه ۳ در مرکز اتصال (زمینه سفید) منطقه غنی از Ag است. این امر به این دلیل است که با نفوذ Ti به سمت مرکز اتصال و قابلیت بالای ایجاد ترکیبات بین فلزی پایه CuTi ، مقدار زیادی از Cu داخل فلز پرکننده با Ti ترکیب می شود. از طرفی میل ترکیبی Ag با Ti بالا نیست. به طوریکه حد حلالیت Ti در Ag طبق نمودار دوتایی شکل ۵ ناچیز است. بنابراین مقدار زیادی Ag به سمت مرکز اتصال پس زده می شود. ترکیبات CuTi در مرکز اتصال دیده شده و

جدول ۵- مشخصات نفوذ بعضی عناصر در Ti [۱۶]

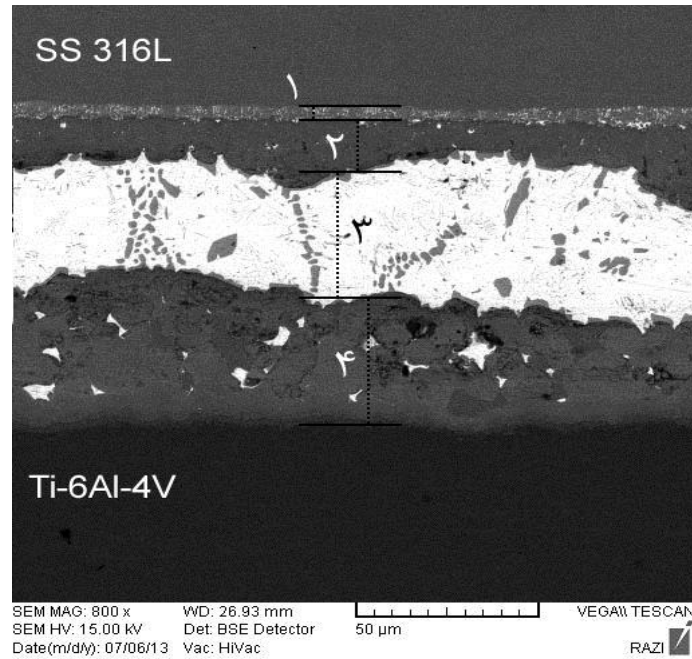
Q (Kj/mol)	D_0 (cm^2/s)	
۳۲۸	۳٫۵	Ti در Ti
۲۴۱	۰٫۵۷	Ti در Cu
۳۵۳	۱۰٫۸	Ti در Ag

نواحی مختلف نشان داده شده در شکل ۷ و جدول ۶ آورده شده است. برای تعیین فازهای ایجاد شده باید از نمودارهای فازی دو و سه تایی استفاده شود.

بزرگنمایی تصویری SEM و آنالیز EDS نمونه لحیم کاری شده در دمای ۸۵۰ °C و زمان ۵ دقیقه در دو سمت -۴V برای تعیین دقیق فازهای تشکیل شده Ti-۶Al و ۳۱۶L،



شکل ۶- نمودار دو فازی الف (Ti-Cu) و ب (Ti-Ag)



شکل ۷- تصویر SEM از مقطع اتصال نمونه لحیم کاری شده در دمای 850°C و زمان ۵ دقیقه.

جدول ۶- آنالیز EDS از نواحی مختلف شکل ۷

فاز احتمالی	آنالیز شیمیایی (برحسب درصد اتمی)									کد
	Cd	Ni	V	Zn	Ag	Cu	Ti	Cr	Fe	
Fe-Cr	۰,۰۰	۲,۸۸	۰,۰۰	۱,۰۴	۸,۲۷	۱,۸۱	۶,۳۱	۱۸,۰۲	۵۵,۵۰	A
CuTi ₂	۰,۰۰	۰,۳۲	۲,۰۱	۱۴,۹۱	۲,۱۶	۲۲,۶۸	۴۶,۱۱	۰,۰۰	۰,۵۲	B
Cu-Zn rich	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۲۱,۲۲	۲,۱۹	۶۱,۴۴	۶,۰۶	۰,۰۰	۰,۰۰	C
β -Ti	۰,۰۰	۰,۰۰	۴,۷۸	۵,۲۴	۱,۵۸	۸,۰۸	۶۳,۹۶	۰,۰۰	۰,۰۰	D

قسمت نفوذ کرده است که توسط آنالیز نقطه ای با SEM مشخص گردیده است.

نکته مهم این است که مقداری Ti در نقطه A دیده می شود. از آنجایی که در فلز پرکننده Ti وجود نداشت، این بدان معناست که Ti از فلز پایه به دلیل قابلیت نفوذ بالا از سمت Ti-۶Al-۴V در مسیر فلز پرکننده مذاب

مطابق آنچه در شکل ۸ (الف) و (ب) مشاهده می شود، همانطور که اشاره شد نقطه A با توجه به حضور عناصر Fe و Cr منطقه Fe-Cr می باشد. با توجه به اینکه درصد Cr کمتر از درصد Fe است، بنابراین می توان نتیجه گرفت که این فاز، فاز σ نیست (فاز σ دارای مقادیر تقریباً برابر Fe و Cr است). نقاط سفید رنگ کوچک که در این بخش دیده می شوند، Ag است که از داخل فلز پرکننده تا این

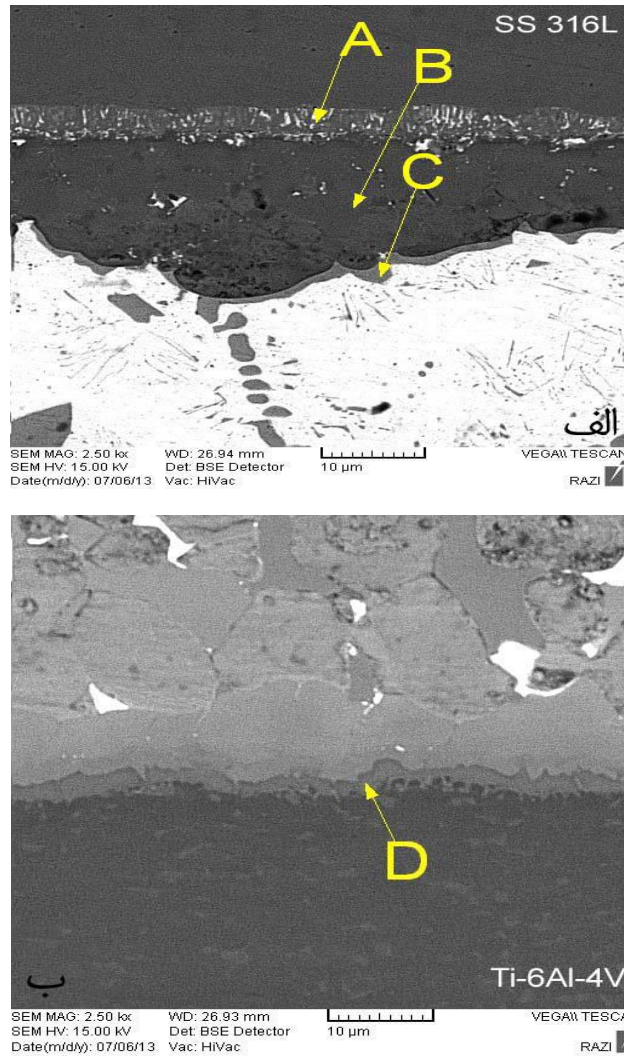
نمونه لحیم کاری شده در دمای 800°C به دلیل وجود حفره در مرکز اتصال ریزساختار مناسبی نداشت. حفرات عامل اصلی تمرکز تنش و محل مناسب برای جوانه زنی و رشد ترک محسوب می‌شوند. در دمای 850°C اما به دلیل وجود فازهای بین فلزی پایه CuTi در مرکز اتصال و نحوه قرارگیری آنها و شکلشان استحکام بالا رفت. دلیل این امر هم افزایش دما و افزایش میزان نفوذ عناصر از فلزات پایه و فلز پرکننده مذاب به درون هم است که منجر به تشکیل فازهای بین فلزی متفاوت پایه CuTi می‌شود. از طرفی در این دما میزان ضخامت لایه $\beta\text{-Ti}$ بسیار بیشتر از نمونه مشابهش در دمای 800°C است. این امر هم می‌تواند به کیفیت بهتر اتصال در سمت آلیاژ Ti-۶Al-۴V بیانجامد. تشکیل فاز Fe-Cr در سمت ۳۱۶L هم به استحکام اتصال در سمت فولاد زنگ نزن کمک می‌کند. نکته مثبت در سمت ۳۱۶L عدم تشکیل فاز ترد σ است. از طرفی وجود منطقه غنی از Ag که ماهیت نرم دارد، در مرکز اتصال، می‌تواند به توزیع یکنواخت‌تر فازهای ترد در زمینه نرم کمک کند. نکته دیگر این است که احتمال تشکیل درصد کمی فازهای بین فلزی TiAg در سمت Ti-۶Al-۴V وجود دارد. اما از آنجاییکه این فاز ترد نیست و حتی نسبت به بقیه خانواده فازهای بین فلزی پایه Ti چقرمگی بیشتری هم دارد، مشکلی برای استحکام اتصال ایجاد نمی‌کند. دنگ و همکاران [۱۷] سختی فاز TiAg را ۹۵ ویکرز معرفی کرده‌اند.

در نمونه لحیم شده در دمای 900°C ، میزان نفوذ برای تشکیل فازهای بین فلزی به شکلی بوده که در مرکز اتصال انبوهی از فازهای بین فلزی وجود دارد. قرارگیری این فازها در کنار هم می‌تواند ایجاد ترک در زوایای کم کند. این امر می‌تواند باعث کاهش استحکام شود. دنگ و همکاران [۱۷] افزایش دما تا میزان 900°C را در زمان‌های زیاد مناسب ندانستند زیرا به دلیل رشد لایه‌های فازهای بین فلزی استحکام اتصال کاهش می‌یابد. همچنین شیو و همکاران [۱۸] تشکیل فازهای بین فلزی پایه TiFe را نسبت به CuTi نامطلوب‌تر دانسته‌اند که این فاز در تحقیق حاضر تشکیل نشد. تغییرات ریزسختی نمونه‌های لحیم شده در دماهای 850°C در شکل ۹ و جدول ۷ دیده می‌شود.

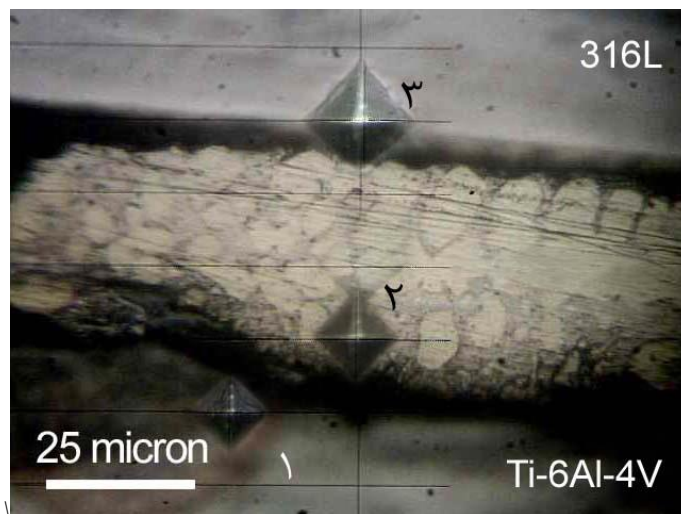
نفوذ کرده و به این منطقه رسیده است. البته حضور این مقدار Ti نمی‌تواند باعث ایجاد ترکیب‌های Fe-Ti شود. اصولاً این ترکیبات در دماهای بالاتر به دلیل نفوذ بیشتر Ti ایجاد می‌شوند. از طرفی همانطور که در شکل ۸ آمده است، طبق نمودارهای دوتایی Fe-Ag و Cr-Ag، Ag با هیچ کدام از عناصر اصلی موجود در ۳۱۶L فازهای بین فلزی نمی‌سازد. بنابراین در منطقه A فازهای بین فلزی مشاهده نمی‌شود.

بررسی نتایج آزمون ریزسختی اتصال

تغییرات استحکام اتصال ارتباط مستقیم با ریزساختار اتصال دارد. برای تأیید حضور فازهای ترد و شکننده بین فلزی که در مرکز اتصال در زمان‌های طولانی رشد می‌کنند، از نتایج آزمون ریزسختی استفاده شد. همانگونه که در بخش بررسی ریزسختی اشاره شد، تقریباً مرکز این اتصال از فازهای بین فلزی پایه CuTi تشکیل شده است. فازهای بین فلزی در اثر ضخیم شدن، دلیل اصلی از بین رفتن استحکام اتصال هستند. در واقع فازهای بین-فلزی می‌توانند به عنوان منبع ایجاد ترک شناخته شوند. این عمل بر اثر شکستن این فازها یا به خاطر شکل غیر کوه‌رنتشان که باعث ایجاد حفره می‌شود، اتفاق می‌افتد. از طرفی بعضی فازهای بین فلزی ماهیت کاملاً ترد دارند به همین دلیل چقرمگی اتصال را به میزان چشمگیری کاهش می‌دهند. بنابراین در حضور انبوهی از فازهای بین فلزی در مرکز اتصال و به دلیل نوع، شکل و ضخامت این ترکیبات، استحکام اتصال Ti-۶Al-۴V و ۳۱۶L می‌تواند دچار مشکل شود. از طرفی عامل استحکام دهی این اتصال هم ایجاد پیوند فازهای بین فلزی می‌باشد. برخلاف لحیم کاری نرم، در اتصالات لحیم کاری سخت مبنای استحکام بخشی تشکیل محلول جامد است و ترکیبات بین فلزی بسته به نوع می‌توانند مفید یا مضر باشند. ولی ضخامت این لایه‌ها می‌بایست به میزان بهینه باشد تا بتواند به عنوان عامل افزایش استحکام معرفی شوند. بنابراین دما و زمان، دو پارامتر مهم در رسیدن به کیفیت بالای ریزساختار و استحکام نهایی هستند.



شکل ۸- تصویر SEM مناطق از مقطع اتصال نمونه لحیم کاری شده در دمای 850°C و زمان ۵ دقیقه الف) تصویر بزرگ شده از مقطع اتصال و سمت ۳۱۶L ب) تصویر بزرگ شده از مقطع اتصال و سمت آلیاژ Ti-۶Al-۴V



شکل ۹- تصویر اثرات سختی سنجی از مقطع اتصال نمونه لحیم کاری شده در دمای 850°C و زمان ۵ دقیقه

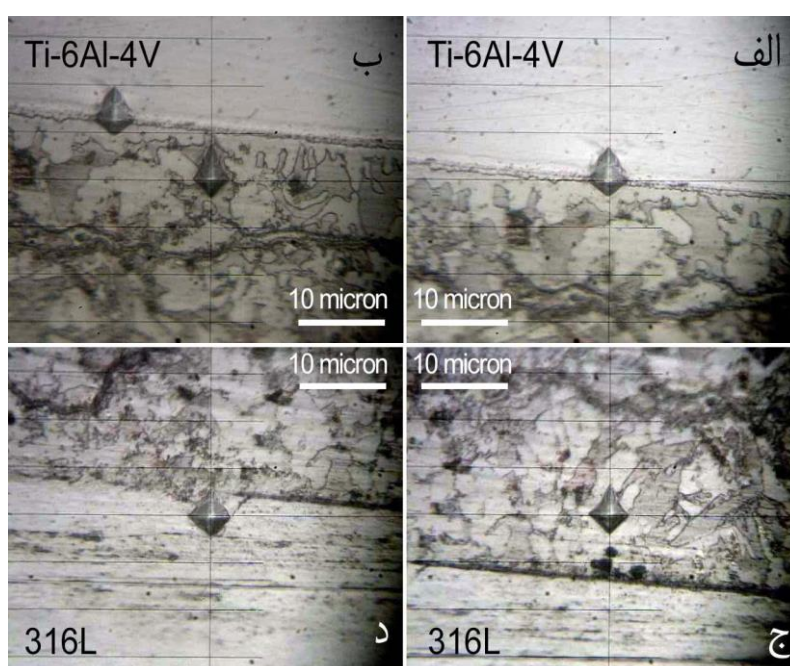
در طول منطقه اتصال از سمت Ti-۶Al-۴V به سمت ۳۱۶L، میزان سختی‌های به دست آمده به ترتیب ۴۴۸، ۴۲۳، ۴۲۳ و ۴۲۳ به دست آمد که سختی‌های بالایی هستند. همین امر نشان دهنده حضور گسترده فازهای بین فلزی در مرکز اتصال است. ماهیت ترد این فازها و همینطور کنار هم قرار گرفتن آنها (محل‌های تشکیل ترک) می‌تواند علت شکست این اتصال باشد. یو و همکاران [۲۰] بیان کرده‌اند که به دلیل افزایش زمان، تیغه‌های CuTi قوی‌تر می‌شوند، بنابراین دمای کمتر مطلوب‌تر است.

همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود در نمونه لحیم شده در دمای °C ۸۵۰ فازهای ترد بین فلزی پایه CuTi₂ در زمینه غنی از Ag قرار گرفته است. سختی فاز CuTi₂ ۳۰۲ ویکرز در مرکز اتصال به دست آمد. همچنین در دو طرف منطقه اتصال، سختی منطقه β-Ti، ۴۰۶ ویکرز و سختی منطقه فاز Fe-Cr هم ۱۷۹ ویکرز شکل به دست آمد. همانطور که قبلاً اشاره شد حضور فازهای ترد، در بستری از Ag قرار گرفته است. علت استحکام بالاتر نمونه لحیم شده در این دما و این زمان هم همین است.

با افزایش دما به °C ۹۰۰، شکل ۱۰ به دلیل سرعت سرد شدن بالا، منطقه وسیعی در میان اتصال شامل فازهای بین فلزی پایه CuTi هستند. افزایش دما باعث انتقال خطوط تعادلی می‌شوند. [۱۹]

جدول ۷- نتایج ریزسختی شکل ۹

منطقه	سختی (ویکرز)	فاز احتمالی
۱	۴۰۶	β-Ti
۲	۳۰۲	CuTi ₂
۳	۱۷۹	۳۱۶L



شکل ۱۰- تصویر سختی از مقطع اتصال نمونه لحیم کاری شده در دمای °C ۹۰۰ و زمان ۵ دقیقه

۲- با افزایش دما تا 850°C به دلیل شرایط نفوذ بهتر، در موضع اتصال فازهای بین فلزی CuTi و همچنین منطقه غنی از Ag و در سمت Ti-6Al-4V، یک لایه β -Ti دیده شد. در سمت 316L یک لایه نازک از Fe-Cr تشکیل شد. قرارگیری این فازها در کنار هم می‌تواند به کیفیت بالای اتصال منجر شود.

۳- با افزایش دما تا 900°C به دلیل نرخ سرد شدن بالا، بین آلیاژ پایه و فازهای بین فلزی جدایش ایجاد شد. در موضع اتصال هم با افزایش دما و زمان، افزایش کسر حجمی فازهای بین فلزی و درشت شدن آنها کیفیت متالورژیکی و مکانیکی اتصال ناکافی بود. بنابراین محدوده دمایی اتصال دهی با فلزات پرکننده پایه نقره، بین 800°C تا 900°C در زمان‌های ۳ و ۵ دقیقه است.

References:

[1] Shiue RK, Wu SK, Shiue JY. Infrared brazing of Ti-6Al-4V and 17-4 PH stainless steel with (Ni)/Cr barrier layer(s). *Materials Science and Engineering: A*. 2008;488:186-94.

[2] Lee JG, Hong SJ, Lee MK, Rhee CK. High strength bonding of titanium to stainless steel using an Ag interlayer. *Journal of Nuclear Materials*. 2009;395:145-9.

[3] M.K. Lee, J.G. Lee, Y.H. Choi, D.W. Kim CKR, Y.B. Lee, Hong SJ. Interlayer engineering for dissimilar bonding of titanium to stainless steel. Elsevier Science. 2010.

[4] Elrefaey A, Tillmann W. Brazing of titanium to steel with different filler metals: analysis and comparison. *Journal of Materials Science*. 2010;45:4332-8.

[5] مداح حسینی، س طح. مازاراتابکی م. لحیم‌کاری سخت و نرم: انتشارات جهان جام جم؛ ۱۳۸۳.

نتایج سختی بدست آمده عبارتند از:

الف) ۴۴۸ ویکرز ب) ۴۲۳ ویکرز ج) ۴۲۳ ویکرز د) ۴۲۳ ویکرز

نتیجه‌گیری

فرآیند لحیم کاری سخت مادون قرمز آلیاژهای Ti-6Al-4V و 316L تحت اتمسفر گاز آرگون با استفاده از فلز پرکننده پایه Ag، در شرایط دما و زمان‌های مختلف انجام شد که نتایج زیر به دست آمد:

۱- در نمونه اتصال یافته با فلز پرکننده پایه Ag در شرایط دمای 800°C و زمان ۵ دقیقه به دلیل حضور حفرات ناشی از خروج گازهای حاصل از تبخیر عنصر Cd اتصال کیفیت بالایی نداشت.

[6] Lee MK, Lee JG, Lee JK, Hong SM, Lee SH, Park JJ, et al. Formation of interfacial brittle phases sigma phase and IMC in hybrid titanium-to-stainless steel joint. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011;21:s7-s11.

[7] گنج‌آسه، مقدم اص، بافقی مف. طراحی و ساخت کوره مادون قرمز با نرخ گرمایش و سرمایش بسیار سریع تحت اتمسفر، فشار و دمای قابل کنترل ۱۳۹۱.

[8] Shiue R-K, Wu S-K, Yang S-HJM, A MT. Infrared Brazing of Ti50Ni50 Shape Memory Alloy and Inconel 600 Alloy with Two Ag-Cu-Ti Active Braze Alloys. 2017;48:735-44.

[9] Shiue R-K, Wu S-K, Yang S-H, Liu C-K. Infrared Dissimilar Joining of Ti50Ni50 and 316L Stainless Steel with Copper Barrier Layer in between Two Silver-Based Fillers 2017.

[10] Ganjeh E, Sarkhosh H, Khorsand H, Sabet H, Dehkordi EH, Ghaffari M. Evaluate of braze joint strength and microstructure characterize of titanium-CP

with Ag-based filler alloy. *Materials & Design*. 2012;39:33-41.

[11] Du YC, Shiue RK. Infrared brazing of Ti-6Al-4V using two silver-based braze alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209:5161-6.

[12] JIS, Z3192, Standard, 1988, Methods for tension and shear tests for brazed joint.

[13] T. Chang C, Shiue R. Infrared brazing Ti-6Al-4V and Mo using the Ti-15Cu-15Ni braze alloy 2005.

[14] Shiue R, Wu SK, Chan CH. The interfacial reactions of infrared brazing Cu and Ti with two silver-based braze alloys 2004.

[15] Bajgholi ME, Soltani Tashi R, Akbari Mousavi AA, Heshmat Dehkordi E. An investigation on metallurgical and mechanical properties of vacuum brazed Ti-6Al-4V to 316L stainless steel using Zr-based filler metal. *Journal of Advanced Materials and Processing*. 2013;1:47-54.

[16] Brandes EA, Brook GB. *Smithells Metals Reference Book*. 7th ed: Butterworth-Heinemann; 2013.

[17] 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 & Design*. 2013;46:84-7.

[18] Lütjering G, Williams JC. *Titanium*. 2 ed: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007.

[۱۹] گل‌عذار دم. اصول و کاربرد عملیات حرارتی: فولادها. دوم ed: دانشگاه صنعتی اصفهان اردیبهشت، ۱۳۹۵.

[20] Yue X, He P, Feng JC, Zhang JH, Zhu FQ. Microstructure and interfacial reactions of vacuum brazing titanium alloy to stainless steel using an AgCuTi filler metal. *Materials Characterization*. 2008;59:1721-7.