

آنالیز کیفیت و ریزساختار اتصال لحیم آلیاژ Ti-6Al-4V با پرکننده‌های پایه تیتانیومی توسط آزمون اولتراسونیک

حمید خرسند
استادیار دانشکده مهندسی مواد
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
hkhorsand@kntu.ac.ir

اسماعیل گنجه*
کارشناس ارشد مهندسی مواد
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
navidganjehie@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۴

چکیده

آلیاژ Ti-6Al-4V در یک کوره اتمسفر کنترل توسط آلیاژ پرکننده آمورف ۱۲۲۸ STEMET با ترکیب شیمیایی (Ti-27Zr-14Cu-13Ni, wt%) لحیم شد. ابتدا کیفیت اتصالات لحیم توسط آزمون اولتراسونیک و با استفاده از روش اندازه گیری ضخامت کراتکرامر برانسون^۱ ارزیابی شد. سپس تأثیر زمان و دماهای مختلف بر ریزساختار و خواص مکانیکی بررسی شد. بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ و بررسی خواص مکانیکی توسط آزمون برش انجام گرفت. ریزساختار اصلی فلزات پایه Ti-6Al-4V با استفاده از این آلیاژ لحیم تغییری نکرد. اتصالات به‌طور عمده از ترکیبات بین فلزی λ -Lave(Cu/Ni)₂[Ti,(Zr)] و γ -Cu/Ni [Ti(Zr)]₂ تشکیل شده بودند. طولانی کردن مدت زمان لحیم کاری، منجر به جایگزینی این فازهای ترد با ساختار ریز سوزنی شکل ویدمنشتاتن^۳ شد که در سراسر اتصال، به دلیل توزیع مجدد عناصر نیکل و مس از آلیاژ لحیم به فلزات پایه، غالب می‌شود. استحکام برشی بهینه برای اتصالات لحیم Ti-6Al-4V در زمان ۳۰ دقیقه، در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵۷۱ مگاپاسکال به دست آمد. از دید تجربی، یافته‌ها حاکی از این است که لحیم‌کاری نمونه‌های سازگار در اتمسفر کنترل شده، که در یک محفظه ایزوله قرار دارند، می‌تواند به‌عنوان یک فرایند مؤثر و اقتصادی در نظر گرفته شود.

واژگان کلیدی: آزمون اولتراسونیک، لحیم کاری سخت، ریزساختار، خواص مکانیکی، آلیاژ Ti-6Al-4V

۱. مقدمه

مواد در صنایعی چون هوافضا، شیمیایی، دریایی و تولید ابزارآلات پزشکی شده است [۱-۲]. تیتانیوم و آلیاژهای آن ابتدا در دو حوزه کاربردی مورد استفاده قرار می‌گیرند،

امروز خصوصیتی چون سبکی، نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت در برابر خوردگی بسیار بالای تیتانیوم و آلیاژهای آن همچون Ti-6Al-4V سبب به‌کارگیری این دسته از

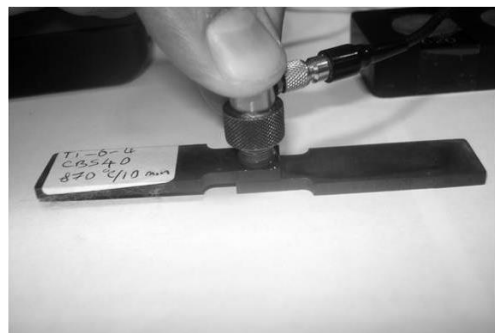
جایی که خواص منحصر به فرد این مواد انتخاب آنها را توجیح می‌کند: مقاومت در برابر سایش و سازه‌های با استحکام و کارآمدی بالا [۳]. در نیمه دوم قرن بیستم، آلیاژ Ti-6Al-4V حدود ۴۵ درصد از کل وزن تیتانیوم تولیدی را شامل می‌شد و کاربرد آن در صنایع هوافضا و زیست‌مواد حدود ۳۳ درصد بود؛ دلیل این امر نیز ترکیب مناسب خواصی چون استحکام، چقرمگی، مقاومت در برابر خوردگی، سازگاری مواد کامپوزیت پلیمری است [۳-۵]. معایب عمده این فلز و آلیاژهای آن، قیمت بالا و مشکلات موجود در اتصال آن است. اتصال مشابه تیتانیوم و آلیاژهای آن از حمله پیچیدگی‌ها و سختی‌های عمده است. تمام نیازمندی‌ها برای اتصالات با کیفیت بالا و همچنین کاهش مواد مورد نیاز، به لحاظ اقتصادی دوام‌پذیر خواهد شد، اگر این اتصالات تحت فرایند مناسب قرار بگیرند [۶]. بسیاری از اتصالات تیتانیوم فرایندهایی چون جوشکاری، لحیم‌کاری و پیوندسازی نفوذی را به کار می‌گیرند [۷-۸]. از این میان، فناوری لحیم‌کاری سخت تیتانیوم به‌طور فزاینده‌ای در صنایع هوافضا و ساخت زیست‌مواد قابل کاشت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹-۱۱]. طی دهه‌های اخیر، لحیم‌کاری سخت تیتانیوم و آلیاژهای آن به یک فرایند اتصال مهم برای دستیابی به کاربردهای سازه‌ای مبدل شده است. لحیم‌کاری سخت تیتانیوم برای کاربرد در دمای بالا غالباً توسط پرکننده‌های آلیاژی پایه تیتانیوم و زیرکونیوم لحیم می‌شود که نیکل و مس به‌عنوان کاهش‌دهنده درجه حرارت ذوب^۴ اضافه می‌شوند [۱۲-۱۳]. تکنیک لحیم‌کاری مورد استفاده در اتصال تیتانیوم و آلیاژهای آن فاکتوری بسیار مهم محسوب می‌شود [۸]. برای لحیم‌کاری سخت تیتانیوم، لحیم‌کاری کوره‌ای یک فرایند صنعتی ایده‌آل در جو خنثی یا خلأ است. اتصالات لحیمی عمدتاً توسط آزمون صوتی مستقیم تست می‌شوند که در آن دامنه اکو از داخل سطح خارجی قطعه فلزی مشاهده می‌شود. اتصال کامل لحیم در نقطه تست، پیوند فلز به فلز انعکاس نسبتاً کمی را بازگشت می‌دهد، حال آنکه یک فضای هوایی انعکاس

بسیار بزرگتری را بازگشت می‌دهد. این سطوح در هر حالت با تنظیم و کالیبره کردن نمونه‌ها نسبت به شرایطی که در آن نمونه لحیم شده است یا نشده است، بنا می‌شوند. امواج اولتراسونیک هم می‌توانند عیوب را در اتصالات لحیم شناسایی کنند و هم قادرند به‌عنوان روشی برای اتصال و پیوند مواد مختلف مورد استفاده قرار بگیرد. هدف اصلی این مقاله تعیین شرایط مناسب لحیم‌کاری برای دستیابی به خواص مکانیکی آرمانی اتصالات لحیم توسط آزمون اولتراسونیک و آنالیز ریزساختار مانند میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نوری است. سپس کیفیت ریزساختار اتصال به خواص مکانیکی اتصال ربط داده خواهد شد.

۲. مواد و روش تحقیق

در این مقاله، ورق‌های Ti-6Al-4V (گرید ۵ ای. اس. تی. ام.^۵) با ضخامت ۳ میلی‌متر به‌عنوان فلزات پایه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. خواص مکانیکی این دسته از ورق‌ها نیز در جدول ۱ ذکر شده است. نمونه‌های برشی تک‌لبه از ورق فلز پایه با استفاده از یک ماشین برش آماده شده و سپس طبق استاندارد JIS Z 3192 با هم‌پوشانی 3T لحیم شدند. سپس این نمونه‌ها با صفحات سنباده^۶ SiC تا شماره ۶۰۰ سنباده شدند و در ادامه در یک حمام اولتراسونیک با استون به‌عنوان سیال قبل از لحیم‌کاری تمیز شدند. همچنین صفحات به تکه‌های ۱۵×۱۰ میلی‌متر برای تحلیل ریزساختار بریده شدند. یک فویل لحیم‌کاری Ti-27Zr-14Cu-13Ni (wt.%) نزدیک به یونکتیک STEMET 1228 با ضخامت ۵۰ میکرومتر به‌عنوان آلیاژ پرکننده لحیم‌کاری مورد استفاده قرار گرفت. فویل لحیم‌کاری قبل از لحیم‌کاری با استون تمیز شد و سپس بین دو ناحیه هم‌پوشانی شده از فلزات اولیه و پایه ساندویچ شد و با دقت در داخل کوره با اتمسفر کنترل‌شده قرار گرفت. لحیم‌کاری کوره‌ای در یک اتمسفر آرگون انجام شد. نرخ گرمایش و سرمایش حین چرخه‌های لحیم‌کاری روی ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تنظیم شدند [۱۵]. آزمون

اولتراسونیک با استفاده از پروب از نوع تمرکزی انجام شد که یک موج طولی با فرکانس ۲۲ مگاهرتز ایجاد می‌کند. اندازه‌گیری‌ها با اندازه‌گیری ضخامت کراتکرامر براونسون طبق AWS C3.8 که در سازمان ایران ایر با استاندارد طبق CL3 DL توسعه یافته است [۱۸]، انجام شد که سطح پروب به سطح اتصال لحیم‌شده اتصال دارد (شکل ۱). کراتکرامر براونسون نقش‌آفرین‌ترین بخش تجهیزات آزمون اولتراسونیک است که جهت انجام آزمون‌های غیرمخرب از فلزات لحیم‌شده در دسترس می‌باشد.



شکل ۱. لوازم آزمون اولتراسونیک برای کنترل کیفیت اتصال لحیم

جدول ۱. خواص مکانیکی فلزات پایه Ti-6Al-4V

فلز پایه	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	درصد ازدیاد طول
Ti-6Al-4V	۹۵۰	۱۰۱۰	۱۴

در ادامه، روش استاندارد آماده‌سازی نمونه، سنگ‌زنی و پولیش، به‌کار گرفته شد [۱۷] و معرف اچ کرول^۶ برای ارزیابی ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد

استفاده قرار گرفت. سطح مقطع نمونه‌های لحیم‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی VEGA/TESCAN مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز کمی ترکیب شیمیایی اتصال لحیم توسط دستگاه طیف‌سنج تفرق انرژی^۷ انجام شد. تست برشی جهت ارزیابی استحکام پیوند اتصالات لحیم با استفاده از ماشین آزمون دینامیک مدل Zwick/Reoll Hct 400/25 با سرعت کشش ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد [۱۵ و ۱۸]. حداقل دو نمونه تست برشی برای هر یک از شرایط لحیم‌کاری آماده و انجام شد.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. آزمون اولتراسونیک

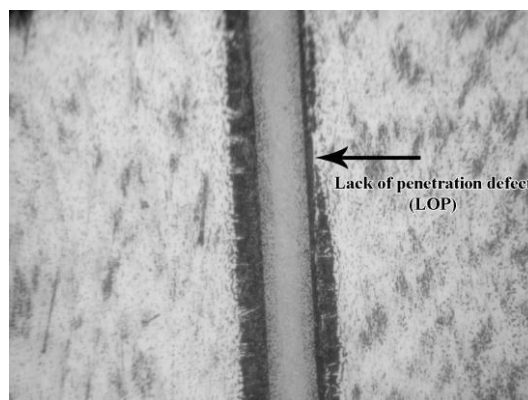
اتصالات لحیم به‌صورت موفقیت‌آمیز در تمامی دماها و زمان‌های لحیم‌کاری مورد مطالعه، تشکیل شدند. بنابر نتایج آزمون اولتراسونیک، اتصالات باکیفیت بدون هیچ‌گونه حفره یا ترک در طول اتصال، تنها برای نمونه‌های لحیم‌شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد که در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. نتایج آزمون اولتراسونیک برای اتصالات لحیم کوره‌ای

نتیجه	ضخامت اتصال (میلی‌متر)	ضخامت لایه (میلی‌متر)	زمان (دقیقه)	دما (سانتی‌گراد)	
				قبول	رد
✓	۳/۰۰	۳/۰۰	۱۰	✓	۹۰۰
✓	۳/۰۱	۳/۰۱	۳۰	✓	۹۰۰
	۵/۶۸	۳	۱۰	✓	۹۵۰
	۵/۹	۲/۹	۲۰	✓	۹۵۰
	۶	۳/۱	۳۰	✓	۹۵۰

با اینکه فلز پرکننده لحیم می‌تواند در دمای لحیم ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شود - که این دما از دمای لیکوئیدوس و سالدوس فلز پرکننده بیشتر است - به‌شدت نسبت به پدیده فرسایش حساس است و همچنین به‌دلیل بحث نفوذ ضعیف سطوح را جهت برقراری پیوند

متالورژیکی به‌طور مناسب تر نمی‌کند. فراتر از آن به‌دلیل کمبود نفوذ، عیوب در فصل مشترک رخ می‌دهد و تحت عنوان عدم وجود باند در اتصال لحیم شناخته می‌شود. این نتایج طبق جدول ۲ در توافق با نتایج آزمون اولتراسونیک هستند. فرم عمومی از این عیب در شکل ۲ نمایش داده شده است. نتیجتاً نمونه‌های لحیم‌شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد حذف شدند و مطالعات روی نمونه‌های مورد قبول متمرکز شده است. دلیل رد شدن به تصاویر ریزساختار، که در ادامه به آن پرداخته می‌شود، مرتبط است.

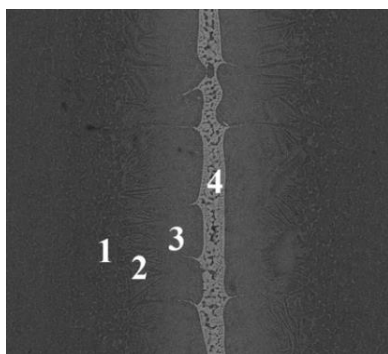


شکل ۲. ریزساختار اتصال لحیم در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه. خط گپ (کمبود نفوذ) به‌وضوح قابل مشاهده بوده و توسط فلش نشان داده شده است.

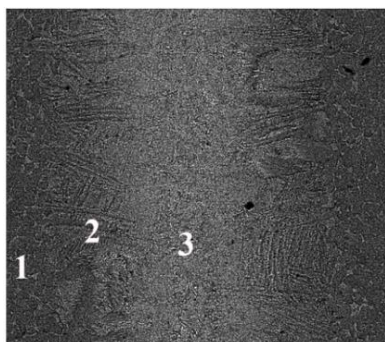
۳-۲. بررسی ریزساختار

در شکل ۳ نتایج آنالیز شیمیایی EDS و SEM-BEI را به‌صورت درصد اتمی Ti-6Al-4V لحیم‌شده کوره‌ای با استفاده از فویل Ti-27Zr-14Cu-13Ni در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه نمایش داده شده است. (جدول ۳). فصل مشترک بین Ti-6Al-4V و آلیاژ لحیم خالی از هرگونه لایه واکنشی پیوسته است. نواحی مشخصه توسط محدودیت‌های حلالیت و نفوذ داخلی شکل می‌گیرند که شامل انجماد هم‌دما و نفوذ حالت جامد حین لحیم‌کاری می‌شود [۱۹]. بر پایه مورفولوژی ریزساختاری و ترکیب شیمیایی، چهار نوع گوناگون ریزساختارهای اتصال مشاهده شدند. تشکیل این نواحی،

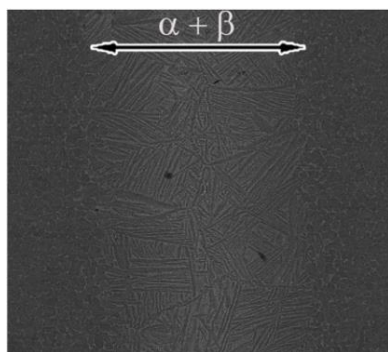
نشان‌دهنده این است که بین آلیاژ پرکننده ذوب‌شده با فلز پایه Ti-6Al-4V حین لحیم‌کاری واکنش شدیدی رخ می‌دهد. نمونه‌های لحیم‌شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ و ۲۰ دقیقه در ابتدا از فاز غنی از Ti آلیاژ شده با نیکل، مس و آلومینیوم تشکیل یافته است که در شکل با اعداد ۱ تا ۳ نشان‌گذاری شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳. تصاویر ریزساختار از آلیاژ Ti-6Al-4V لحیم‌شده کوره‌ای در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت (الف) ۱۰ دقیقه، (ب) ۲۰ دقیقه، (ج) ۳۰ دقیقه

نمونه‌ها با افزایش زمان لحیم‌کاری ارتقا می‌یابد. دانستن این موضوع که لحیم‌کاری به مدت ۲۰ دقیقه سبب افزایش طول بیشتری نسبت به سایر زمان‌های لحیم می‌شود، قابل توجه است. توسعه ساختار یوکتوئیدی (شکل ۳) باعث ایجاد استحکام بالا و افزایش طول بیشتر می‌شود. نمونه‌هایی که تنها شامل ریزساختار ظریف یوکتوئیدی و ویدمنشتاتن + یوکتوئیدی بودند، افزایش طول بالایی دارند و رفتار داکتیل از خودشان نشان می‌دهند [۲۰]. نمونه‌های لحیم‌شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه کمترین مقدار استحکام برشی معادل ۲۹۲ مگاپاسکال و افزایش طولی معدل ۳۳ درصد داشتند. با افزایش زمان لحیم‌کاری به ۲۰ دقیقه استحکام افزایش یافته و حدود ۱/۵ برابر بیشتر می‌شود (۴۰۳ مگاپاسکال) و افزایش طول ۴۸ درصد می‌شود. افزایش زمان لحیم به ۳۰ دقیقه سبب دستیابی به حداکثر استحکام برشی معدل ۵۴۰ مگاپاسکال می‌شود، اما افزایش طول نمونه به کمترین مقدار اسمی خود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد و شکست به‌جای اتصال لحیم‌شده در امتداد فلز پایه اشاعه و گسترش می‌یابد. در نتیجه، استحکام برشی نمونه‌های لحیم‌شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش زمان لحیم، افزایش می‌یابد و برای زمان لحیم ۳۰ دقیقه، اتصالات در فلز پایه شکسته می‌شوند. افزایش طول این نمونه‌ها حتی از افزایش طول فلز پایه اصلی بهتر است، احتمالاً این امر به دلیل از بین رفتن تنش‌های موضعی و نسبی حین چرخه لحیم‌کاری رخ می‌دهد.

۵. نتیجه‌گیری

آلیاژ Ti-6Al-4V به‌صورت موفقیت‌آمیزی با استفاده از آلیاژ پرکننده STEMET ۱۲۲۸ در یک کوره با اتمسفر کنترل‌شده آرگون لحیم‌کاری شد. توسعه ریزساختاری، استحکام پیوندی و آنالیز کنترل کیفیت (با استفاده از آزمون اولتراسونیک) به‌صورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نیز به‌طور خلاصه به‌قرار زیر است:

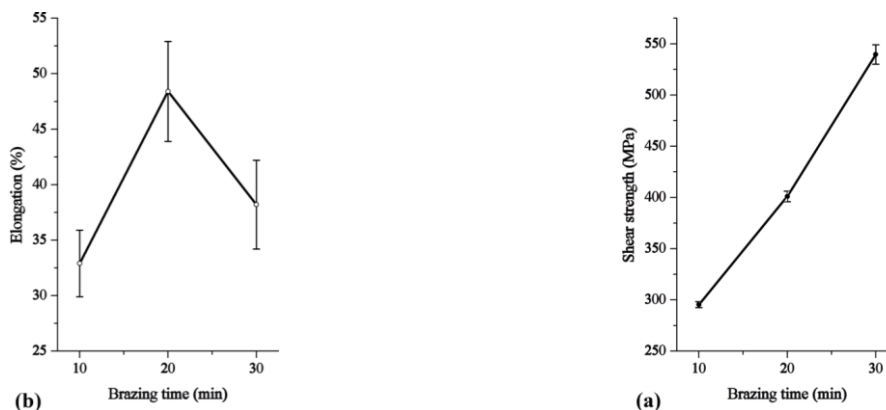
در مرحله ابتدایی لحیم‌کاری، فلز پایه Ti-6Al-4V به‌طور قابل ملاحظه‌ای در آلیاژ پرکننده ذوب‌شده حل می‌شود. در نتیجه، پرکننده ذوب‌شده در مجاورت فلز پایه Ti-6Al-4V از تیتانیوم غنی‌تر می‌شود. فاز اولیه، که به‌صورت هم‌دمای منجمد می‌شود، ترجیحاً تیتانیوم α است تا تیتانیوم β . به این دلیل که دمای لحیم‌کاری پایین‌تر از دمای استحاله β - α است. وقتی فاز تیتانیوم α جوانه می‌زند و به‌داخل اتصال رشد می‌کند، اتم‌های اضافی نیکل و مس از فاز در حال رشد تیتانیوم α خارج می‌شوند و در ناحیه مرکزی جدایش پیدا می‌کنند. حد حلالیت مس و نیکل در تیتانیوم α بسیار کمتر از مقدار آن برای تیتانیوم β است. بنابراین فاز استحاله‌یافته تیتانیوم β در ناحیه جدایش‌یافته شکل می‌گیرد، به‌دلیل آنکه عناصر مس و نیکل پایدارکننده فاز تیتانیوم β هستند. نهایتاً، عدم وجود فاز تیتانیوم β در اتصال لحیم، به‌وسیله تجزیه یوکتوئید این فاز به فازهای لایه‌ای و ظریف تیتانیوم α و γ (β -Ti \rightarrow α -Ti + γ) و $(\text{Ti,Zr})_2\text{Ni} + (\text{Ti,Zr})_2\text{Cu}$) در مراحل بعدی سرمایه‌ش توجیح می‌شود. این سازوکار جوانه‌زنی و رشد انتخابی منجر به شکل‌گیری ریزساختار مشخصه‌ای موسوم به ساختار ویدمنشتاتن یا سوزنی می‌شود [۱ و ۱۱]. جنبه سوزنی‌شکل بودن به‌دلیل نرخ سرمایه‌ش بالا تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه از دمای لحیم تا دمای محیط ایجاد می‌شود (شکل ۳). تشکیل ساختار سوزنی در هر دو اتصال می‌تواند توسط انجماد هم‌دمای، که حین لحیم‌کاری رخ می‌دهد، توضیح داده شود. نفوذ کامل در فصل مشترک فلز پایه با آلیاژ پرکننده باعث عبور تمامی امواج اولتراسونیک از ضخامت شده است که مؤید آن است که هیچ عیبی در اتصالات لحیم‌کاری شده وجود ندارد.

۴. خواص مکانیکی اتصالات

در شکل ۴ خواص مکانیکی نمونه‌های لحیم‌شده Ti-6Al-4V در زمان‌های لحیم متفاوت نمایش داده شده است. نتایج تست این حقیقت را آشکار کرد که استحکام برشی

ویدمنشتاتن در ناحیه لحیم شده حین چرخه لحیم در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۳۰ دقیقه حاصل شد. همچنین بیشترین مقدار میانگین تنش برشی معادل ۵۴۰ مگاپاسکال، که برابر استحکام فلز پایه است، به دست آمد. کاهش ترکیبات بین فلزی خصوصاً فاز λ دلیل اصلی برای افزایش استحکام اتصال است.

خروجی‌های اولتراسونیک آشکار کرد که دمای لحیم‌کاری ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند یک اتصال لحیم قابل قبول برقرار کند. نفوذ ناقص از آلیاژ پرکننده به فلز پایه سبب ایجاد نقص و عیب کمبود نفوذ می‌شود. چند ترکیب بین‌فلزی نظیر فازهای γ - $[(Ti,Zr)_2Cu/Ni]$ و λ -Laves $(Ni,Cu)_2[Ti,(Zr)]$ توسط آنالیز SEM-EDS شناسایی و تأیید شدند. یکنواختی در توزیع عناصر و ساختار



شکل ۴. داده‌های به دست آمده از نمودارهای تنش - کرنش برای استحکام برشی (a) و افزایش طول (b) برای اتصال لحیم‌شده $Ti-6Al-4V$ در زمان‌های مختلف لحیم‌کاری در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد

جدول ۳. آنالیز شیمیایی از منطق نشان داده شده در شکل ۳

فاز احتمالی	ترکیب شیمیایی (درصد اتمی)						نشانه
	Cu	Ni	Zr	V	Al	Ti	
$\alpha + \beta$	2.1	2	1	3.7	6.2	85	۱
Acicular $\alpha + \beta Ti$	2.4	4.9	2.1	2.3	9.7	78.6	۲
$(\alpha-Ti) + Cu-Ni$ in Ti-rich	7	6	3.7	0.3	6.2	76.8	۳
$(Ti,Zr)Cu_2 (Ti,Zr)_2Ni, (Ti,Zr)_2Cu$	15.2	14	12.4	1	2.9	54.5	۴

۶. مآخذ

- [1] Elrefaey, A., W. Tillmann. "Brazing of titanium to steel with different filler metals: analysis and comparison." *Journal of Materials Science* 45, (2010):4332–4338.
- [2] Elrefaey, A., W. Tillmann. "Microstructure and Mechanical Properties of Brazed Titanium/Steel Joints." *Journal of materials science* 42, (2007): 9553–9558.
- [3] Donachie, M.j. *Titanium: a technical guide*, ASM; USA, 2000.
- [4] Cantor, B., H. Assender, P. Grant, *Aerospace Materials*, IOP; 2001.
- [5] Moiseyev, V.N. *Titanium Alloys Russian Aircraft and Aerospace Applications*, Taylor & Francis, 2006.

- [6] Elrefaey, A., W. Tillmann. "Correlation between microstructure, mechanical properties, and brazing temperature of steel to titanium joint." *Journal of Alloys and Compounds* 487, (2000): 639-645.
- [7] Elrefaey, A., W. Tillmann. "Effect of brazing parameters on microstructure and mechanical properties of titanium joints." *Journal of Materials Processing Technology* 209, (2009):4842-4849.
- [8] Schwartz, M.M. *Brazing*, ASM; USA, 2003.
- [9] Shapiro, A., A. Rabinkin. "State of the art of titanium-based brazing filler metals." *Welding Journal*, October 2003, pp. 36-43.
- [10] Jiang, G., D. Mishler, R. Davis, J.P. Mobley and J.H. Schulman. "Zirconia to Ti-6Al-4V Braze Joint for Implantable Biomedical Device." *Journal Biomedical Material Research*, Part B 72B, (2005):316-321.
- [11] Iijima, M., W.A. Brantley, I. Kawashima, N. Baba, S.B. Alapati, T. Yuasa, H. Ohno and I. Mizoguchi. "Microstructures of Beta-Titanium Orthodontic Wires Joined by Infrared Brazing." *Journal Biomedical Material Research*, Part B 79B, 2006, pp. 137-141.
- [12] Chang, C.T., Z.Y. Wu, R.K. Shiue and C.S. Chang. "Infrared brazing Ti-6Al-4V and SP-700 alloys using the Ti-20Zr-20Cu-20Ni braze alloy." *Materials Letters* 61, (2007):842-845.
- [13] Kang, D.H., J.H. Sun, D.M. Lee, S.Y. Shin and H.S. Kim. "Partially alloyed filler sheet for brazing of Ti and Its alloys fabricated by spark plasma sintering method." *Materials Science and Engineering A* 527, (2009):239-244.
- [14] JISZ3192: Methods for tension and shear tests for brazed joint, 1988.
- [15] Ganjeh, E., H. Sarkhosh, H. Khorsand, H. Sabet, E.H. Dehkordi and M. Ghaffari. "Evaluate of braze joint strength and microstructure characterize of titanium-CP with Ag-based filler alloy." *Materials and Design* 39, (2012):33-41.
- [16] AWS C3.8: *Recommended practice for ultrasonic inspection of brazed joints*, 1997.
- [17] Metals Handbook, Vol 9: metallography and microstructures, ASM; USA, 1998.
- [18] Lee, J.G., G.H. Kim, M.K. Lee and C.K. Rhee. "Intermetallic formation in a Ti-Cu dissimilar joint brazed using a Zr-based amorphous alloy filler." *Intermetallics* 18, (2010):529-535.
- [19] Hong, I.T., C.H. Koo. "Microstructural evolution and shear strength of brazing C103 and Ti-6Al-4V using Ti-20Cu-20Ni-20Zr) wt %) filler metal." *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 24, (2006):247-252.
- [20] Lutjering, G., J.C. Williams, *Titanium*, Berlin: Springer, 2007.

1. Krautkramer Branson
2. SEM
3. Widmanstätten
4. MPDs
5. ASTM

6. Kroll
7. EDS