

بررسی مکانیزم و اثر زمان لحیم کاری بر ریز ساختار و استحکام اتصال زوج $Ti6Al4V/Al_2O_3$

محمود فاضل نجف آبادی^۱، محمد حسین مومن پور^{۲*}

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، بخش فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، اصفهان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد

اسلامی، نجف آباد، ایران

*mh_momenpour@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۲۲)

چکیده

در این پژوهش، اثر زمان لحیم کاری بر ریز ساختار و استحکام اتصال حاصل از لحیم کاری سخت زوج $Ti6Al4V/Al_2O_3$ ، با استفاده از آلیاژ لحیم Ag-Cu در محیط هوا مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختاری انجام شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) وجود چند فاز متفاوت را در فصل مشترک نشان داد. آنالیز نقطه‌ای (EDS)، بر روی این فازها حضور عناصر تیتانیم، مس، نقره، آلومینیم، وانادیوم و اکسیژن را در فازهای شناسایی شده تایید کرد. آزمون پراش اشعه ایکس و اطلاعات مستخرج از نمودارهای پایداری فازی، حضور ترکیبات بین فلزی Ti-Cu را در نزدیکی آلیاژ $Ti6Al4V$ و لایه‌ی واکنشی $CuAlO_2 + Cu_2O$ را در ناحیه اتصال و نزدیک به سرامیک Al_2O_3 تایید کرد. همچنین ارزیابی ریزساختار اتصالات حاصل مشخص نمود، در نمونه‌ی لحیم کاری شده به مدت ۱۰ دقیقه، لایه‌های واکنشی به همراه ترکیبات بین فلزی مورد بحث به مقدار ناچیزی تشکیل شده است، اما ابعاد آنها با افزایش زمان لحیم کاری به طور چشمگیری افزایش یافته است. این تغییرات ابعادی تا جایی پیش رفته است که در فصل مشترک نمونه‌ی لحیم کاری شده به مدت ۲۵ دقیقه منجر به ایجاد ترک شد. بیشترین استحکام برشی معادل ۲۹۵ MPa برای نمونه‌ی لحیم کاری شده به مدت ۱۵ دقیقه به دست آمد.

واژه‌های کلیدی:

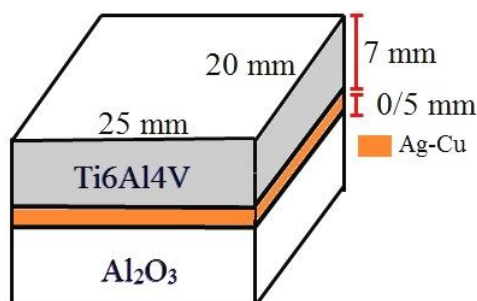
لحیم کاری سخت، اتصال فلز/سرامیک، اتصال $Al_2O_3/Ti6Al4V$ ، آلیاژ لحیم Ag-Cu.

۱- مقدمه

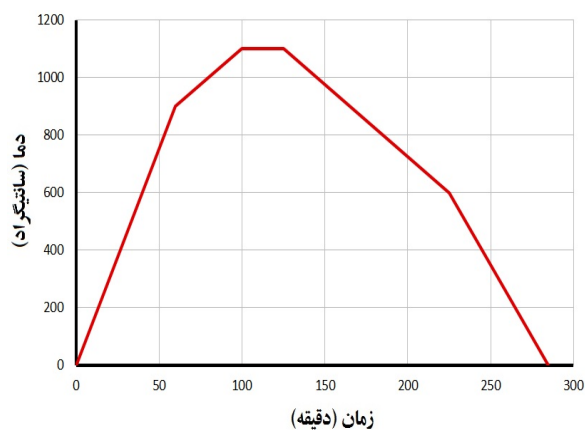
تولید تجهیزات پزشکی و دندان پزشکی (پروتزها و ایمپلنت‌ها) می‌باشد [۱]. البته باید توجه داشت که عواملی همچون تردی و عدم شکل‌پذیری آلومینا ($K_{IC} = 3-4.5 \text{ MPa.m}^{1/2}$)، سبب

سرامیک آلومینا (Al_2O_3)، به سبب دارا بودن ویژگی‌هایی خاص نظیر مقاومت به خوردگی و سازگاری زیستی با بدن انسان، یکی از مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین سرامیک‌های خنثی در زمینه‌ی

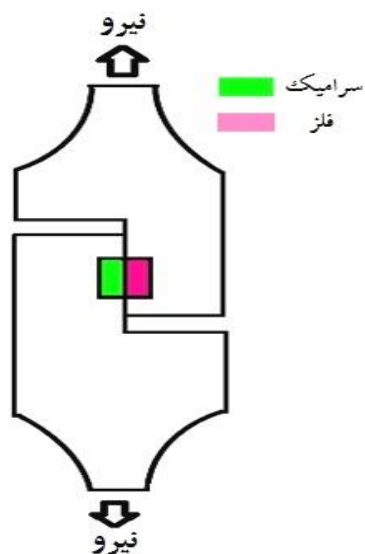
دست آوردن استحکام برشی، ابتدا نمونه‌ها، درون نگهدارنده (شکل ۳) قرار گرفته و سپس از دستگاه INSTRON-4486 (با سرعت کشش ۰/۵ mm/min) استفاده شد.



شکل (۱): تصویر نمادین از طرح اتصال Ti6Al4V/Al₂O₃



شکل (۲): مراحل گرمایش و سرمایش قطعات لحیم کاری شده



شکل (۳): تصویر نمادین از نگهدارنده نمونه های تحت کشش-برش

ایجاد محدودیت در طراحی و همچنین افزایش احتمال شکست، در اثر افزایش نیرو یا زمان بارگذاری می شود [۲]. یک راه حل برای رفع این مشکل، اتصال آلومینا به مواد فلزی می باشد [۳]. آلیاژ Ti6Al4V، از معدود آلیاژ هایی می باشد که ضمن سازگاری با بدن موجودات زنده و مقاومت در برابر تجزیه الکتروشیمیایی [۴]، دارای چقرمگی شکست مناسب (110 MPa.m^{1/2}) می باشد [۵]. از این رو اتصال سرامیک و فلز مذکور، محدودیت های ایجاد شده در طراحی قطعات پزشکی را برطرف خواهد ساخت. از شیوه های اتصال Ti6Al4V و Al₂O₃ می توان به روش لحیم کاری سخت، اشاره کرد [۶]. اگرچه ممکن است عواملی همچون اختلاف ضریب انبساط حرارتی Al₂O₃ و Ti6Al4V در روند اتصال و میزان استحکام تاثیر منفی بگذارد [۷]، ولی با انجام فرایند لحیم کاری در دما و زمان بهینه، می توان به اتصالی با خواص متالورژیکی و مکانیکی مطلوب دست یافت [۸]. از دیگر عوامل موثر در لحیم کاری سخت، ترشوندگی سطوح تحت اتصال به خصوص سرامیک می باشد که با انتخاب آلیاژ لحیم مناسب، این امر نیز تحقق می یابد [۹].

۲- مواد و روش انجام تحقیق

در این پژوهش، از آلیاژ Ti6Al4V (ASTM B265 Gr.5) و سرامیک Al₂O₃ (خلوص ۹۹٫۹٪)، با ابعاد ۲۵×۲۰×۷ میلی متر و همچنین آلیاژ لحیم ۶۰Cu-۴۰Ag (فویل با ضخامت ۰/۵ میلی متر) استفاده شد (شکل ۱). سطوح تحت اتصال، قبل از انجام فرایند لحیم کاری، توسط کاغذهای سنباده‌ی سیلیکون کاربرد (۱۰۰-۱۲۰)، دستگاه اولتراسونیک و استون، مورد تمیزکاری و چربی زدایی قرار گرفتند. عملیات لحیم کاری در دمای ۱۱۰۰°C و به مدت ۲۵-۱۰ دقیقه در محیط هوا انجام شد. فرایند گرمایش و سرمایش نمونه‌ها، مطابق با شکل ۲ انجام شد. ناحیه اتصال توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (TESCAN VEGA) و طیف‌نگار تفکیک انرژی (EDS)، مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که آنالیز فازی سطوح شکست، توسط پراش پرتوی ایکس (PHILIPS PW3040)، انجام شد. برای به

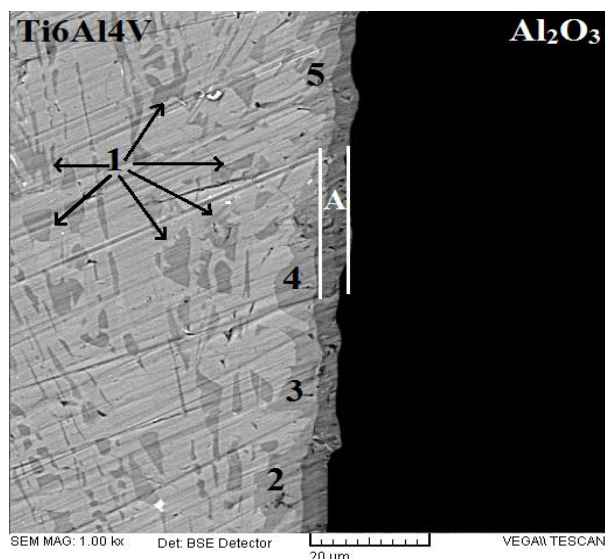
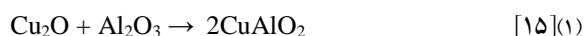
۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از مجموعه آزمون‌های انجام شده در این تحقیق در ادامه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

۳-۱- بررسی‌های ریز ساختاری

شکل ۴، ریز ساختار ناحیه اتصال Ti6Al4V/Al₂O₃ (لحیم کاری شده در دمای ۱۱۰۰°C به مدت ۱۵ دقیقه) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این اتصال عاری از هرگونه عیب و یا حفره‌ای می‌باشد. جدول ۱ آنالیز نقطه‌ای و شکل ۵ طیف EDS نواحی مشخص شده در شکل ۴ را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های موجود، در دمای ۱۱۰۰°C، آلیاژ Ti6Al4V به صورت تک فاز β است [۱۰]. پس از انجام فرایند لحیم کاری و با آهسته سرد شدن قطعات، فاز α شروع به جوانه‌زنی می‌کند و وسعت آن با گذشت زمان افزایش می‌یابد. عنصر V، سبب پایداری فاز β شده و مانع از تبدیل کامل آن به فاز α می‌شود. از اینرو در دمای محیط مقداری β درون ریزساختار باقی می‌ماند که به صورت مناطق سیاه رنگ (شکل ۴ ناحیه ۱)، در آلیاژ Ti6Al4V مشاهده می‌شود [۱۱-۱۲]. لازم به ذکر است که نزدیک به سمت سرامیکی از جنس Al₂O₃، لایه‌ی واکنشی A نیز دیده می‌شود. در مورد نحوه‌ی تشکیل این لایه می‌توان گفت که احتمالاً در آغاز فرایند و با ذوب شدن آلیاژ لحیم، مقداری از اکسیژن محیط لحیم کاری، وارد مس مذاب شده است. طبق نتایج بدست آمده در تحقیقات کیم، این مذاب ترشوندگی سطح Al₂O₃ را افزایش می‌دهد [۱۳]. البته باید توجه داشت که مقدار اکسیژن وارد شده به مس مذاب باید محدود باشد تا بتواند به راحتی از ناحیه‌ی اتصال خارج شود. زیرا در غیر این صورت سبب ایجاد حفره در فصل مشترک سرامیک/فلز می‌شود [۱۴]. با گذشت زمان و با انجام واکنش بین مذاب مس حاوی اکسیژن و سطح Al₂O₃، یک لایه نازک از CuAlO₂ بر روی سطح آلومینا شکل می‌گیرد (واکنش ۱) [۱۵]. پس از انجام فرایند لحیم کاری و در حین سرد شدن قطعات، مذاب مس حاوی اکسیژن در دمای ۱۰۶۶°C (در نقطه‌ی ۰/۴۳ wt% O) طی یک تحول یوتکتیکی

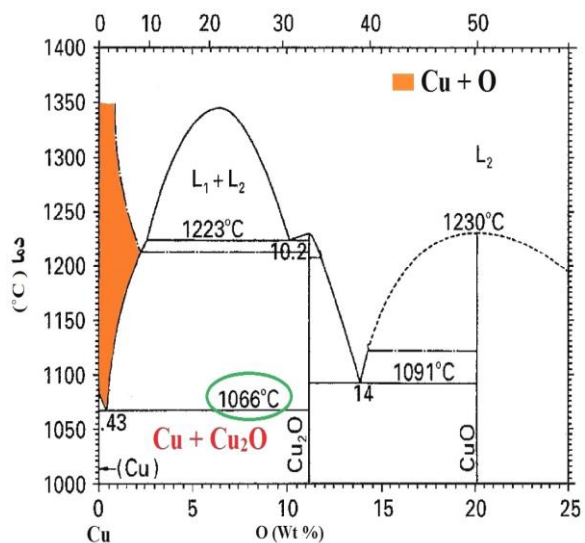
به ترکیب Cu+Cu₂O تبدیل می‌شود (شکل ۶) [۱۶]. این ترکیب ضمن ترکدن سطح لایه‌ی CuAlO₂، به آن نیز متصل می‌شود. با توجه به توضیحات بیان شده می‌توان نتیجه گرفت که لایه‌ی A، مخلوطی از Cu₂O و CuAlO₂ می‌باشد.



شکل (۴): تصویر SEM از اتصال Ti6Al4V/Al₂O₃، لحیم کاری شده در دمای ۱۱۰۰°C، به مدت ۱۵ دقیقه

جدول (۱): آنالیز نقطه‌ای نواحی مشخص شده در شکل ۴

ترکیب (wt.%)						ناحیه
O	V	Ag	Al	Cu	Ti	
-	۳/۷	-	-	-	۹۶/۳	۱
-	/۴	۲۰/۲	-	۴۸/۶	۳۰/۸	۲
-	۰/۲	۳۰/۱	۰/۳	۴۸/۹	۲۰/۵	۳
-	-	۱۹/۸	۰/۴	۵۳/۷	۲۶/۱	۴
-	۰/۴	۳۳/۸	-	۴۵/۱	۲۰/۷	۵
۱۰/۷	-	۱۴/۲	۵/۱	۴۴/۸	۲۵/۲	A



شکل (۶): نمودار دوتایی مس-اکسیژن [۱۶]

برای مشخص شدن فازهای ایجاد شده احتمالی در نواحی ۲، ۳، ۴ و ۵، ابتدا باید نفوذ مس و نقره در تیتانیم، مورد بررسی قرار گیرد. به سبب اینکه غلظت عناصر نفوذ کننده در هر نقطه از فصل مشترک با گذشت زمان تغییر می کند، قانون دوم فیک (رابطه ۲) می تواند در روشن شدن موضوع کمک نماید [۱۷].

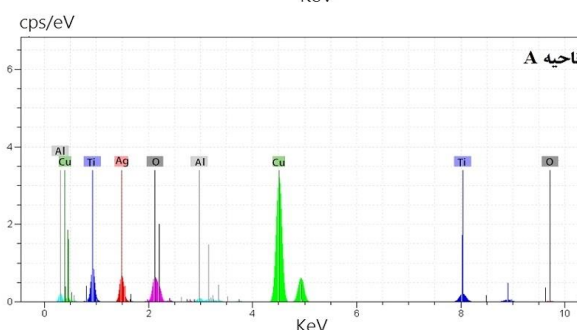
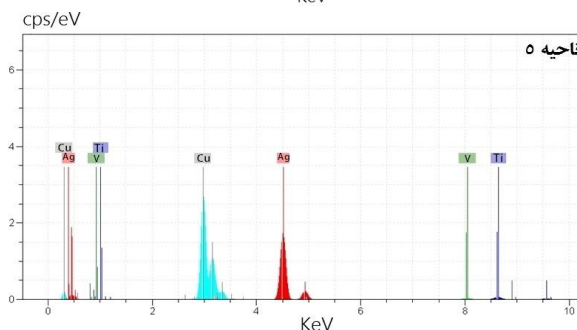
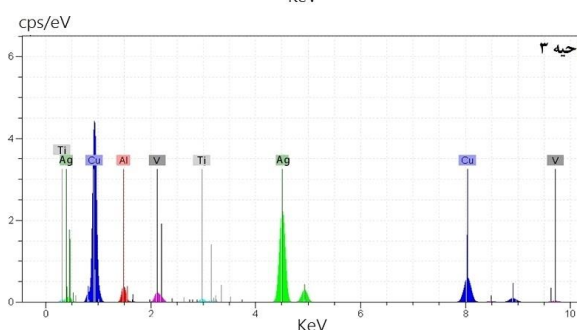
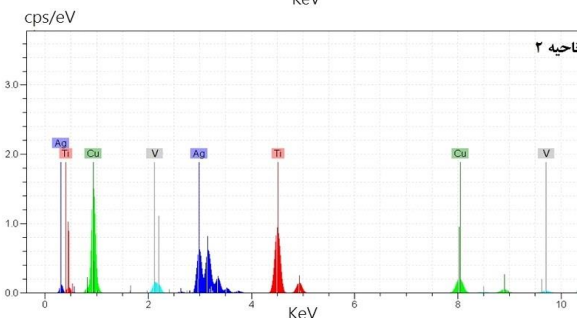
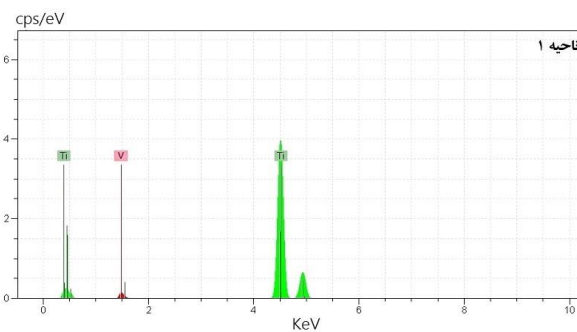
$$(\partial C/\partial t) = D \times (\partial^2 C/\partial X^2) \quad [17] (2)$$

با مشاهده شکل ۴ و جدول ۱، مشخص می شود که آلیاژ لحیم تا انتهای فلز پایه، نفوذ نکرده است. بنابراین برای حل قانون دوم فیک می توان سیستم نفوذی را نیمه بینهایت در نظر گرفت [۱۸]. با اعمال شرایط مرزی (روابط ۳ و ۴) [۱۸]، رابطه ۵ به دست می آید [۱۹] که به کمک آن می توان غلظت مس و نقره در هر نقطه از Ti6Al4V را محاسبه نمود.

$$t > 0 \text{ در } x = 0 \text{ برای } \rightarrow C = C_s \quad [18] (3)$$

$$t = 0 \text{ در } x > 0 \text{ برای } \rightarrow C = C_0 \quad [18] (4)$$

$$C(x,t) = C_s - [(C_s - C_0) \cdot \text{erf} [(1/2) \cdot X \cdot (D \cdot t)^{-1/2}]] \quad [19] (5)$$



شکل (۵): طیف EDS به دست آمده برای نواحی مشخص شده در شکل ۴

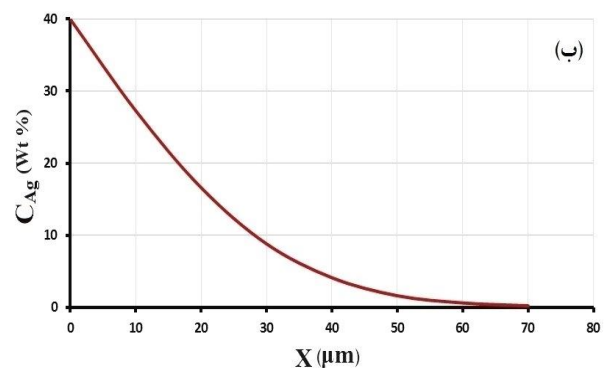
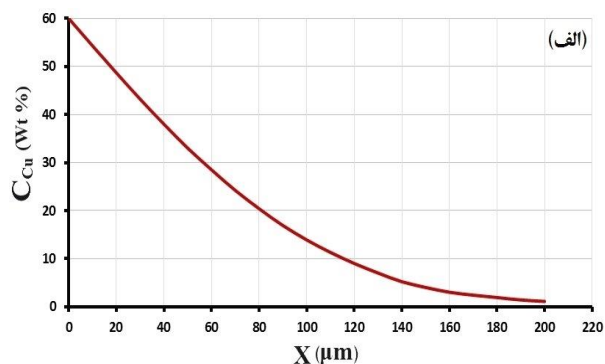
جدول (۲): ضرایب نفوذ مس و نقره در تیتانیم

D Ag in Ti	DCu in Ti	ضریب نفوذ (m ² /s) دما (°C)
۳/۳۵ × ۱۰ ^{-۱۰}	۳/۹ × ۱۰ ^{-۱۰}	۱۱۰۰

جدول (۳): مقادیر C₀ و C_S با توجه به ترکیب شیمیایی آلیاژ لحیم

C ₀	C _S	غلظت (wt.%) حالت نفوذ
۰	۶۰	نفوذ مس در تیتانیم
۰	۴۰	نفوذ نقره در تیتانیم

با جایگذاری مقادیر عددی (جدول ۲ و ۳) در رابطه ۵، نمودار غلظت عنصر نفوذ کننده بر حسب فاصله از محل نفوذ به دست می آید (شکل ۸).



شکل (۸): نمودار غلظت عنصر نفوذ کننده بر حسب فاصله از محل نفوذ. در دمای ۱۱۰۰° و زمان ۱۵ دقیقه: (الف): نفوذ مس در تیتانیم و (ب): نفوذ نقره در تیتانیم

$C(x, t)^*$ = غلظت عنصر نفوذ کننده در زمان t و در فاصله x از محل شروع نفوذ (wt.%)

C_S^* = غلظت عنصر نفوذ کننده در سطح ماده ای که نفوذ در آن انجام می شود (wt.%)

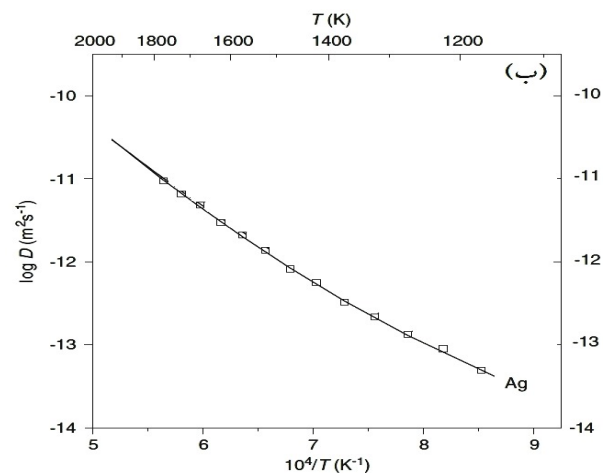
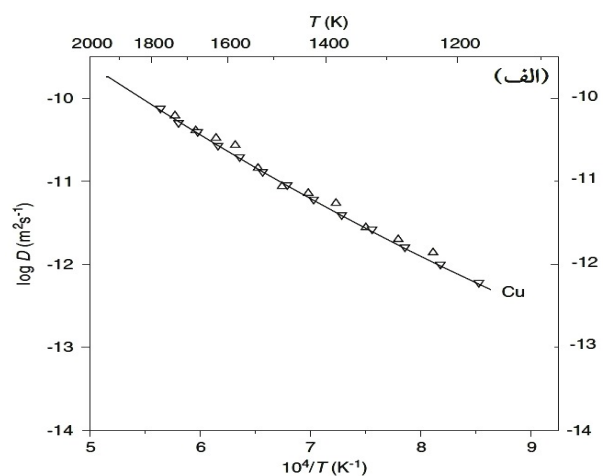
C_0^* = غلظت اولیه ی عنصر نفوذ کننده در داخل ماده ای که نفوذ در آن انجام می شود. (wt.%)

D^* = ضریب نفوذ (m²/s)

t^* = زمان لحیم کاری (S)

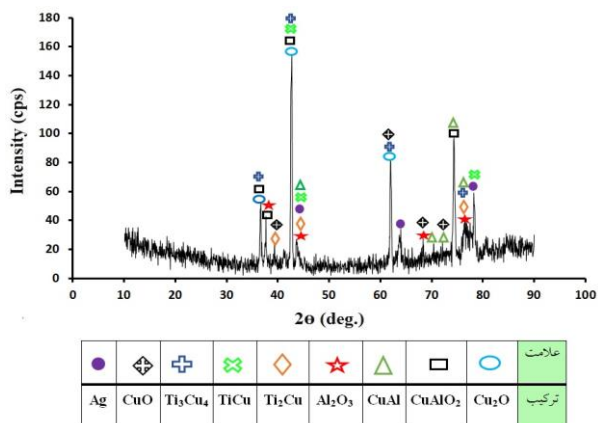
erf^* = تابع خطا

به کمک نمودارهای تجربی (شکل ۷) [۲۰] می توان ضرایب نفوذ مس و نقره در تیتانیم را به دست آورد (جدول ۲).



شکل (۷): نمودار تجربی لگاریتم ضریب نفوذ بر حسب دما: (الف): نفوذ مس در تیتانیم و (ب): نفوذ نقره در تیتانیم [۲۰]

در ناحیه اتصال تایید گردید (شکل ۱۰).



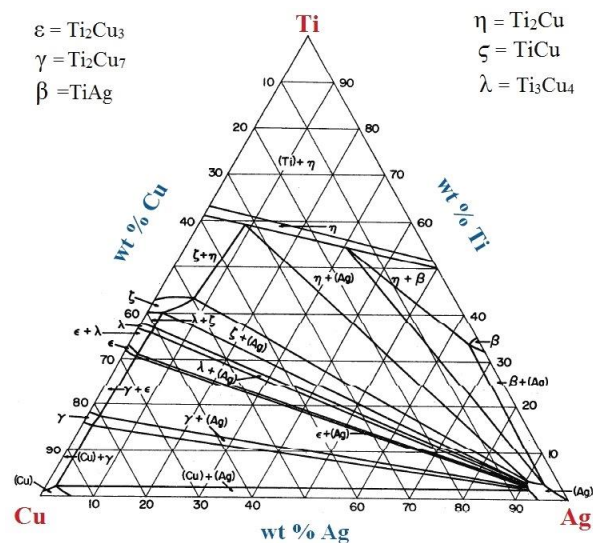
شکل (۱۰): آنالیز فازی (XRD) از سطح شکست نمونه‌ی لحیم کاری شده در دمای ۱۱۰۰°C، به مدت ۱۵ دقیقه

۳-۲- اثر زمان لحیم کاری بر ریز ساختار

ریز ساختار اتصال Ti6Al4V/Al₂O₃ (لحیم کاری شده در دمای ۱۱۰۰°C، به مدت ۲۰ و ۲۵ دقیقه) در شکل ۱۱ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۵ آنالیز نقطه‌ای و شکل ۱۲ طیف EDS برخی از نواحی مشخص شده در شکل ۱۱ را نشان می‌دهد. برای بررسی اثر زمان لحیم کاری بر ریز ساختار اتصال، باید نفوذ مس و نقره در تیتانیوم در زمان‌های مورد نظر بررسی شود. برای این منظور نمودار غلظت برحسب فاصله مطابق با توضیحات بیان شده در قسمت ۳-۱ رسم گردید (شکل ۱۳). با مقایسه‌ی اشکال ۸ و ۱۳ مشخص شد که با افزایش زمان لحیم کاری، مس و نقره در عمق بیشتری از تیتانیوم نفوذ کرده است. این بدان معنی است که احتمال تشکیل ترکیبات بین فلزی در فاصله‌ی دورتر از فصل مشترک سرامیک و فلز، افزایش خواهد یافت. به عبارت دیگر، از مقایسه‌ی اشکال ۱۱، الف و ۴، دو نتیجه حاصل می‌شود. نخست آنکه، زمان لحیم کاری کوتاه مانع از گسترش ترکیبات بین فلزی خصوصاً در عمق آلیاژ Ti6Al4V و فواصل دور از فصل مشترک می‌شود. و دوم آنکه در زمان لحیم کاری کوتاه، لایه‌ی واکنشی بین آلومینا و آلیاژ لحیم (لایه‌ی A) همچنان تشکیل خواهد شد. اما ضخامت آن بسیار محدود خواهد بود. لازم به

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نواحی ۲ تا ۵ در فاصله‌ی ۱۲ میکرومتری از سطح Ti6Al4V قرار دارند. با مراجعه به شکل ۸، مشخص می‌شود که در این فاصله، مقادیر مس و نقره‌ی نفوذ کرده در تیتانیوم با درصد‌های وزنی به دست آمده از آنالیز نقطه‌ای (جدول ۱)، تقریباً مطابقت دارد. با توجه به توضیحات بیان شده می‌توان نتیجه گرفت که در نواحی یاد شده، عناصر مس و نقره به طور حتم وجود دارد. اما باید توجه داشت که مس تمایل بیشتری (نسبت به نقره) برای تشکیل ترکیبات بین فلزی با تیتانیوم دارد [۱۲]. بنابراین نواحی ۲ تا ۵ به احتمال فراوان، ترکیبات Ti-Cu هستند. با استفاده از نمودار سه‌تایی Ti-Cu-Ag (شکل ۹) [۲۱]، استکیومتری این ترکیبات به دست می‌آید (جدول ۴).



شکل (۹): نمودار سه‌تایی تیتانیوم-مس-نقره [۲۱]

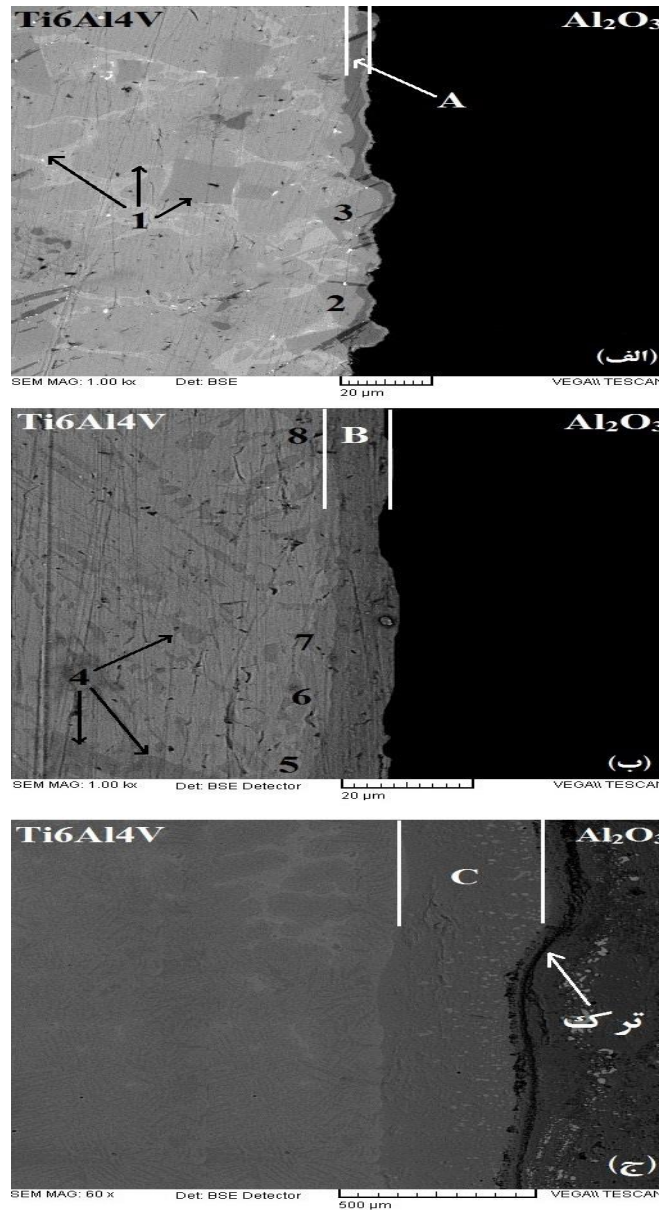
جدول (۴): فازهای احتمالی ایجاد شده در شکل ۴

ناحیه	۲	۳	۴	۵
فاز احتمالی	$\lambda + \zeta$	$\lambda + \text{Ag}$	$\varepsilon + \text{Ag}$	$\varepsilon + \lambda$

با انجام آزمون پراش پرتوی ایکس از سطح شکست نمونه لحیم کاری شده به مدت ۱۵ دقیقه، حضور ترکیبات مورد بحث

۲۰ دقیقه، ضخامت لایه‌ی واکنشی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. مس نیز با نفوذ بیشتر به درون Ti6Al4V، ضمن افزایش پایداری فاز β ، سبب رشد ترکیبات Ti-Cu شده است. قبلاً محققین این موضوع را گزارش نموده‌اند [۱۲].

ذکر است که علیرغم ضخامت کم لایه‌ی واکنشی و مقدار ترکیبات Ti-Cu در زمان لحیم کاری ۱۰ دقیقه، واکنش‌های انجام شده جهت برقراری اتصال بدون عیب، کافی بوده است. در شکل ۱۱. ب، مشاهده می‌شود، با افزایش زمان لحیم کاری تا



شکل (۱۱): تصویر SEM از اتصال Ti6Al4V/Al₂O₃، لحیم کاری شده در دمای ۱۱۰۰°C، به مدت: (الف): ۱۰، (ب): ۲۰، و (ج): ۲۵ دقیقه

افتاده است. همین عامل سبب گسترش لایه‌ی واکنشی در مقایسه با ترکیبات بین‌فلزی شده است. با افزایش بیشتر زمان

به نظر می‌رسد، با افزایش زمان لحیم کاری، واکنش بین سرامیک و آلیاژ لحیم بسیار سریع‌تر از نفوذ مس و نقره در تیانیم اتفاق

مصرف مس در نزدیکی Al_2O_3 و منجر به کاهش مس در نزدیکی Ti_6Al_4V شده است. احتمالاً عدم تشکیل ترکیبات Ti-Cu نتیجه این پدیده بوده است.

لحیم کاری (شکل ۱۱. ج)، واکنش‌های بین آلومینا و آلیاژ لحیم به طور چشمگیری افزایش یافته و تقریباً تمام حجم ناحیه‌ی اتصال را لایه‌ی واکنشی تشکیل داده است. تشکیل لایه‌ی C سبب

جدول (۵): آنالیز نقطه‌ای نواحی مشخص شده در شکل ۱۱

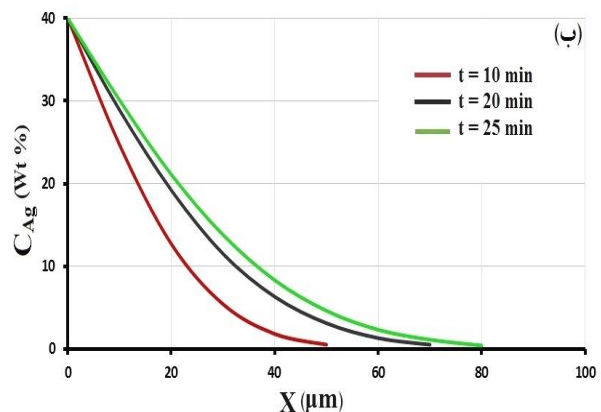
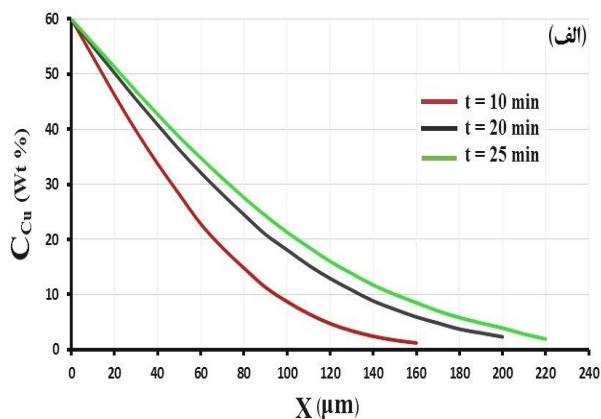
فاز احتمالی	ترکیب (wt.%)						ناحیه
	O	V	Ag	Al	Cu	Ti	
β -Ti	-	۴/۲	-	-	-	۹۵/۸	۱
$\lambda + \zeta$	-	-	۲۱/۳	۰/۱	۴۷/۴	۳۱/۲	۲
$\varepsilon + \lambda$	-	۰/۴	۲۰/۷	۰/۳	۵۲/۷	۲۵/۹	۳
β -Ti	-	۲/۹	-	-	-	۹۷/۱	۴
$\lambda + Ag$	-	۰/۴	۱۹/۹	-	۴۹/۳	۳۰/۴	۵
$\gamma + Ag$	-	۰/۱	۳۰/۲	۰/۵	۴۷/۹	۲۱/۳	۶
$\varepsilon + Ag$	-	-	۲۰/۴	۰/۲	۵۴/۲	۲۵/۲	۷
$\lambda + Ag$	-	-	۲۰/۱	۰/۲	۵۳/۴	۲۶/۳	۸
CuAlO ₂ + Cu ₂ O	۱۶/۳	۰/۲	۱۳/۸	۳/۹	۴۲/۷	۲۳/۱	A
	۱۲/۶	-	۱۴/۹	۴/۸	۴۳/۴	۲۴/۳	B
	۱۶/۷	۰/۱	۱۰/۵	۴/۳	۴۷/۸	۲۰/۶	C

الف لایه‌ی A). بنابراین احتمالاً به علت کمبود محصولات واکنش، رخنه‌ی ترکیبات ایجاد شده به داخل حفرات سرامیک، جهت ایجاد یک اتصال با استحکام بالا کافی نبوده است (شکل ۱۵ الف). اما با افزایش مدت لحیم کاری به ۱۵ دقیقه، از یک طرف حجم بیشتری از سرامیک درگیر واکنش‌ها شده و از طرف دیگر میزان انجام واکنش‌ها نیز افزایش یافته است (شکل ۴ لایه‌ی A). با افزایش محصولات واکنش، رخنه‌ی ترکیبات ایجاد شده به داخل سرامیک، نیز زیادتر شده است (شکل ۱۵ ب). وقوع همین عامل ضمن افزایش چسبندگی لایه‌های واکنشی به سطح سرامیک و سبب افزایش استحکام شده است. اما باید توجه داشت که ترکیبات Cu_2O و $CuAlO_2$ ، بسیار ترد و شکننده هستند. از اینرو افزایش بیش از اندازه‌ی ابعاد آنها (در اثر بالابردن زمان لحیم کاری)، سبب افزایش تنش‌های پسماند، ایجاد ترک در قسمت سرامیک (شکل ۱۱ ج) و کاهش استحکام برشی خواهد شد. نتایج حاصل با این توجیه تطابق داشته است.

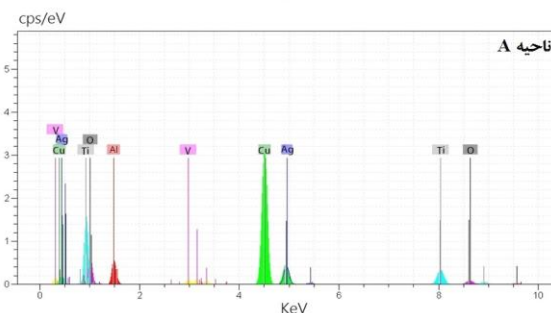
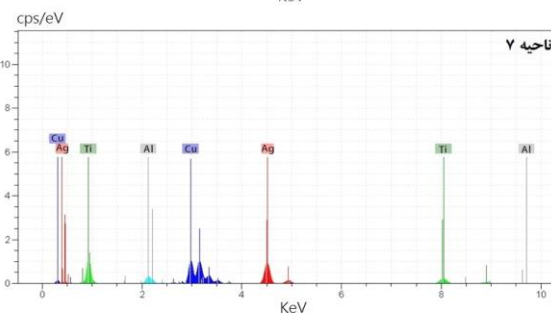
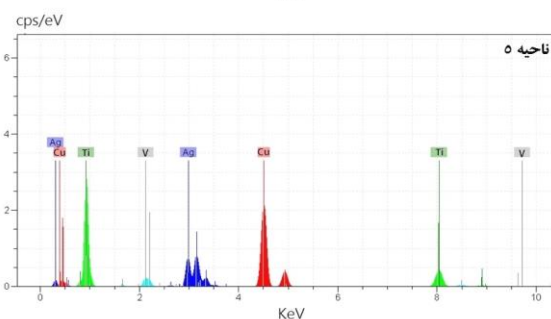
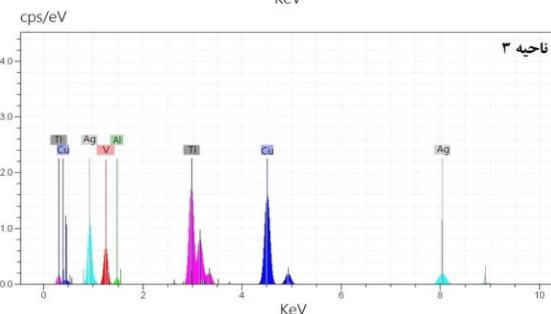
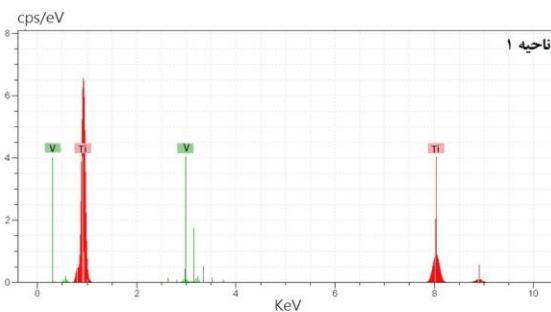
۳-۳- اثر زمان لحیم کاری بر استحکام اتصال

اثر زمان فرایند لحیم کاری بر استحکام برشی اتصال $Ti_6Al_4V/AgCu/Al_2O_3$ در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان لحیم کاری از ۱۰ به ۱۵ دقیقه، استحکام برشی نیز از ۱۷۰ به ۲۹۵ مگاپاسکال افزایش یافته است. در حالی که در بازه‌ی زمانی ۱۵ تا ۲۵ دقیقه، استحکام روند نزولی داشته و در نهایت به ۵۰ MPa رسیده است. در توجیح این رخداد دو علت را می‌توان به شرح ذیل ذکر کرد: ۱- آلیاژ لحیم مذاب به همراه ترکیبات ایجاد شده در فصل مشترک سرامیک/ آلیاژ لحیم، با جریان یافتن (رخنه) بین تخلخل‌های موجود در سرامیک، سبب پشدن حفرات آن می‌شود. پشدن حفرات سرامیک، سبب برقراری اتصال بین سرامیک و لایه‌ی واکنشی تشکیل شده بر روی سطح سرامیک خواهد شد. باید توجه داشت که در زمان لحیم کاری ۱۰ دقیقه، حجم کمی از Al_2O_3 با $Ag-Cu$ واکنش داده است (شکل ۱۱

شده است. این در حالی است که امکان نفوذ مس در Ti6Al4V و تشکیل ترکیبات Ti-Cu در زمان ۱۰ دقیقه چندان زیاد نیست و واکنش‌های منجر به تشکیل آنها احتمالاً به میزان کافی انجام نشده است. لذا، استحکام برشی اندازه گیری شده، چندان مناسب نیست. اما با افزایش زمان لحیم کاری به ۱۵ دقیقه، ترکیبات ذکر شده بیشتر تشکیل شده و سبب افزایش استحکام شده است. نکته‌ی حائز اهمیت آن است که رشد بی رویه این ترکیبات (در اثر افزایش زمان لحیم کاری از ۱۵ به ۲۵ دقیقه)، نه تنها کمکی به بالابردن استحکام نکرده، بلکه به دلیل ترد بودن آنها، استحکام، کاهش یافته است.



شکل (۱۳): نمودار غلظت عنصر نفوذ کننده بر حسب فاصله از محل نفوذ. در دمای ۱۱۰۰°C و زمان ۱۰، ۲۰ و ۲۵ دقیقه: (الف): نفوذ مس در تیتانیوم و (ب): نفوذ نقره در تیتانیوم



شکل (۱۲): طیف EDS به دست آمده برای نواحی مشخص شده در شکل ۱۱
۲- وجود ترکیبات Ti-Cu با استکیومتری متفاوت، سبب افزایش چسبندگی Ti6Al4V به لایه‌های موجود بر روی سطح سرامیک

به برقراری اتصال عاری از هر گونه عیب و یا حفره گردید.
 ۲- در دمای لحیم کاری، مس موجود در آلیاژ لحیم با نفوذ به داخل Ti6Al4V سبب ایجاد ترکیبات بین فلزی Ti-Cu شد.
 ۳- با ورود اکسیژن به داخل مس مذاب، از یک طرف ترشوندگی سطح آلومینا افزایش یافت و از سوی دیگر لایه واکنشی $CuAlO_2 + Cu_2O$ تشکیل شد.
 ۴- با افزایش زمان لحیم کاری از ۱۰ به ۲۵ دقیقه، لایه واکنشی $CuAlO_2 + Cu_2O$ رشد بیشتری در مقایسه با دیگر ترکیبات داشت. همین عامل منجر به افزایش تنش های پسماند در ناحیه اتصال و ایجاد ترک در نمونه ی لحیم کاری شده به مدت ۲۵ دقیقه شد.

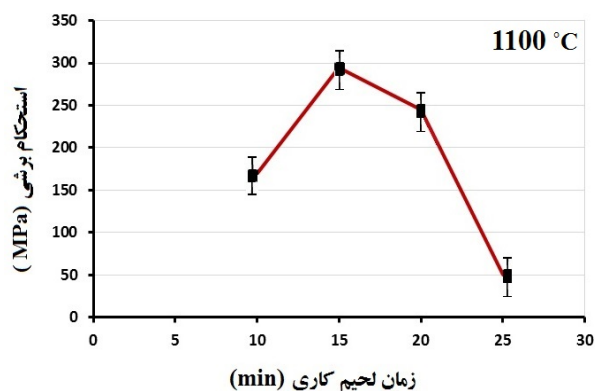
۵- استحکام برشی برای نمونه های لحیم کاری شده در بازه زمانی ۱۰ تا ۱۵ دقیقه افزایش و از ۱۵ تا ۲۵ دقیقه کاهش یافت.
 ۶- بیشترین استحکام برشی (۲۹۵MPa)، مربوط به نمونه ی لحیم کاری شده به مدت ۱۵ دقیقه بود.
 ۷- با افزایش رخنه ی ترکیبات بین فلزی به داخل حفرات سرامیک، استحکام برشی نیز افزایش یافت.
 ۸- تشکیل ترکیبات Ti-Cu، جهت برقراری اتصال، امری ضروری است. کاهش و یا افزایش بیش از اندازه ی آن در ناحیه ی اتصال، منجر به افت استحکام می شود.

۵- تشکر و قدردانی

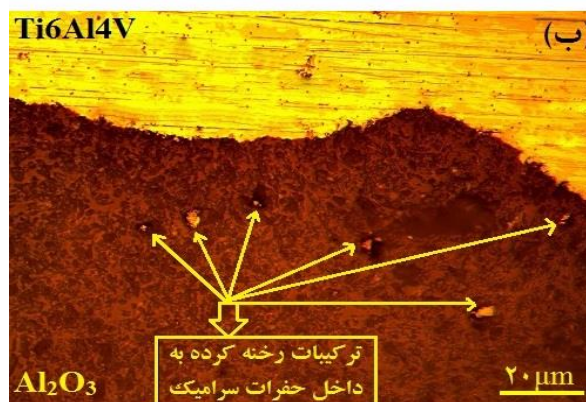
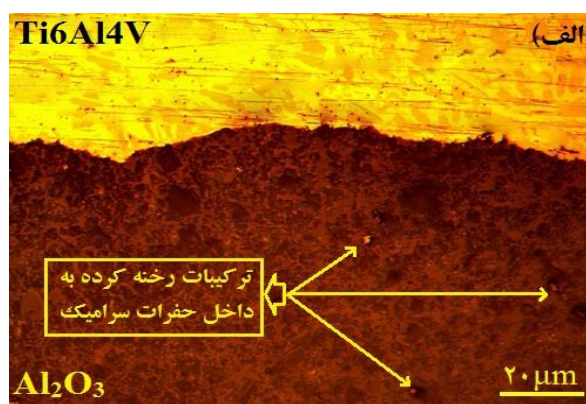
نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند از همکاری آزمایشگاه های مهندسی مواد دانشگاه پیام نور مرکز اصفهان و مرکز تحقیقات مواد پیشرفته ی دانشکده مهندسی مواد دانشگاه آزاد نجف آباد تشکر نمایند.

۶- مراجع

- [1] J. B. Park & J. D. Bronzino, "biomaterials principles and applications", 2003.
- [2] H. Yanagida, K. Koumoto & M. Miyayama, "The chemistry of ceramics", 1996.
- [3] K. M. Hafez, M. H. El-Sayed & M. Naka, "Joining of alumina ceramics to metals", Science and



شکل (۱۴): اثر زمان فرایند لحیم کاری بر استحکام برشی اتصال Ti6Al4V/Al₂O₃



شکل (۱۵): رخنه ی ترکیبات بین فلزی به داخل حفرات سرامیک، لحیم کاری شده در دمای ۱۱۰۰ °C، به مدت: (الف): ۱۰ دقیقه و (ب): ۱۵ دقیقه

۴- نتیجه گیری

اهم نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می گردد:
 ۱- لحیم کاری سخت زوج غیر هم جنس Ti6Al4V/Al₂O₃ توسط آلیاژ لحیم Ag-Cu در محیط هوا با موفقیت انجام و منجر

- Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 4001-4011, 2008.
- [14] H. Ghasemi, A. H. Kokabi, M. A. Faghihi Sani, & Z. RiaziM, "alumina – copper eutectic bond strength: contribution of preoxidation, cuprous oxides particles, and pores", Materials Science Forum, Vol. 32, 2008.
- [15] C. W. Seager, K. Kokini, K. Trumble & M. J. M. Krane, "The influence of CuAlO₂ on the strength of eutectically bonded Cu /Al₂O₃ interfaces", Scripta Materialia, Vol. 46, pp. 395-400, 2002.
- [16] A. M. Meier, P. R. Chidambaram, G.R. Edwards, "A comparison of the wettability of copper- copper oxide and silver-copper oxide on polycrystalline alumina", Journal of Material Science, Vol. 30, pp. 4781-4786, 1995.
- [17] G. Kostorz, "Phase transformations in materials", Wiley-Vch, 2001.
- [18] P. Shewmon, "Diffusion in solids", second edition, 1991.
- [۱۹] خ. ا. صدر نژاد، "فرایندهای سینتیکی در مهندسی مواد و متالورژی"، امیرکبیر، چاپ چهارم، ۱۳۹۲.
- [20] G. Neumann & C. Tuijn, "self-diffusion and Impurity diffusion in pure metals", Elsevier, first edition, 2009.
- [21] Y. Austin Chang, D. Gildberg & J. P. Neumann, "Phase diagram and thermodynamic properties of ternary copper silver system", Vol. 6, pp. 621-673, 1977.
- Technology of Welding and Joining, Vol. 10, pp. 125-130, 2005.
- [۴] م. خدائی، م. مرآتیان، ا. صوابی و م. ح. فتحی، "اثر دمای تف جوشی بر ویژگی‌های کاشتنی تیتانیومی متخلخل تولید شده به روش فضاکنگ دارنده جهت استفاده در بازسازی بافت سخت"، فصلنامه علمی پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۳، صفحه ۱-۹، پاییز ۱۳۹۴.
- [۵] م. ح. فتحی و و. مرتضوی، "بیومواد فلزی"، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، چاپ اول، ۱۳۸۲.
- [6] M. Yang, T. Lin, P. He & Y. Huang, "Brazing of Al₂O₃ to Ti-6Al-4V alloy with in situ synthesized TiB-whisker- reinforced active brazing alloy", Ceramics International, Vol. 37, pp. 3029-3035, 2011.
- [7] M. Yang, T. Lin & P. He, "Cu + TiB₂ composite filler for brazing Al₂O₃ and Ti-6Al-4V alloy", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 512, pp. 282-289, 2012.
- [8] M. Yang, P. He & T. Lin, "Effect of brazing conditions on microstructure and mechanical properties of Al₂O₃/Ti6Al4V alloy joints reinforced by TiB whiskers", J. Mater. Sci. Technol, Vol. 29, pp. 961-970, 2012.
- [9] G. Kumar & K. N. Prabhu, "Review of non-reactive and reactive wetting of liquids on surfaces", Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 133, pp. 61-89, 2007.
- [۱۰] خ. فرمنش، "بررسی تغییرات ریزساختاری آلیاژ Ti-6Al-4V کارگرم شده بعد از انجام فرایند آنیلینگ"، فصلنامه علمی پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱، شماره ۱، صفحه ۴۷-۵۱، تابستان ۱۳۸۶.
- [11] C. R. Brooks, "Heat treatment, structure and properties of non ferrous alloy", American Society for Metals, 1982.
- [12] J. Cao, Z. J. Zheng, L. Z. Wu, J. L. Qi, Z. P. Wang & J. C. Feng, "Processing, microstructure and mechanical properties of vacuum-brazed Al₂O₃/Ti6Al4V joints", Materials Science and Engineering, Vol. 535A, pp. 62-67, 2012.
- [13] J. Y. Kim, M. Engelhard, J. P. Choi & K. S. Weil, "Effects of atmospheres on bonding characteristics of silver and alumina", International