

## تشکیل ترکیب بین فلزی $Al_3Ti$ در فصل مشترک اتصال زوج نفوذی آلومینیوم- تیتانیم از طریق انجام عملیات حرارتی نفوذی

مجید طاووسی\* و سجاد ارجمند

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳)

**چکیده-** در این پژوهش، شکل‌گیری ترکیب بین‌فلزی  $Al_3Ti$  در فصل مشترک اتصال آلومینیوم- تیتانیم در حین فرایند جوشکاری قوس- تنگستن تحت پوشش گاز محافظ و عملیات حرارتی مورد بررسی واقع شده است. براساس نتایج حاصل، در حین انجام عملیات رسوب‌گذاری، لایه ظریفی از ترکیب بین‌فلزی  $Ti_3Al_2$  در فصل مشترک اتصال ایجاد می‌شود. طی انجام عملیات حرارتی در دمای  $550^\circ$  درجه سانتی‌گراد، این لایه به فاز بین‌فلزی  $Al_3Ti$  تبدیل شده و شروع به رشد می‌کند. با انجام عملیات حرارتی در دماهای بالاتر، نرخ رشد لایه بین‌فلزی  $Al_3Ti$  افزایش یافته و هم‌زمان با آن شکل‌گیری حفرات کِرکندال، به هم پیوستن حفرات و جدایش زوج نفوذی از محل اتصال با آلومینیوم اتفاق می‌افتد.

واژه‌های کلیدی: آلومینیدهای تیتانیم، عملیات حرارتی نفوذی، اثر کِرکندال.

### The Formation of $Al_3Ti$ Intermetallic Compound at the Junction Interface of Titanium-Aluminum Diffusional Coupling by Means of Diffusional Annealing Process

M. Tavoosi\* and S. Arjmand

Department of Materials Engineering, Malek-Ashtar University of Technology (MUT), Shahin-Shahr, Isfahan, Iran.

**Abstract:** In this study, the formation of the  $Al_3Ti$  intermetallic compound at the junction interface of aluminum-titanium was investigated during deposition and annealing. The results illustrated that during the deposition process, one thin layer of  $Ti_3Al_2$  intermetallic compound was created at the junction interface. During the annealing at  $550^\circ C$ , this layer was transformed to the  $Al_3Ti$  intermetallic phase and the layer growth occurred. By performing annealing at higher temperatures, the growth rate of  $Al_3Ti$  intermetallic layer was increased; at the same time, the formation of Kirkendall cavities and coupling in the cavities and fragmentation of diffusional coupling from the junction with aluminum were observed.

**Keywords:** Titanium aluminides, Diffusional annealing, Kirkendall effect.

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ma.tavoosi@gmail.com

ترکیب‌های بین‌فلزی تیتانیوم-آلومینیوم با داشتن خواص منحصر به فردی همچون نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت عالی در برابر اکسیداسیون و خواص مکانیکی قابل قبول در دمای بالا، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده‌اند [۱]. ترکیب‌های  $Ti_3Al$ ،  $Ti_2Al_2$ ،  $TiAl_2$ ،  $TiAl_3$  و  $Ti_3Al$  پنج ترکیب بین‌فلزی در گروه آلومینیدهای تیتانیوم هستند که امکان تشکیل آنها در دمای محیط وجود دارد [۲].

در میان روش‌های مختلف موجود در تولید آلومینیدهای آلومینیوم، روش عملیات حرارتی نفوذی به دلیل سادگی فرایند و هزینه‌های تولید پایین مورد توجه بوده و تحقیقات وسیعی را [۳-۸] در راستای توسعه این فرایند به خود اختصاص داده است. به‌عنوان نمونه، سوچاتا و همکاران [۹] با ایجاد یک زوج نفوذی آلومینیوم-تیتانیوم از طریق ریخته‌گری آلومینیوم در قالبی از جنس تیتانیوم و انجام عملیات حرارتی، گزارش کردند که در ابتدا ترکیب بین فلزی  $Al_3Ti$  در فصل مشترک تشکیل شده و سپس آلومینیوم با نفوذ از میان این لایه، با تیتانیوم وارد واکنش می‌شود. اورا و همکاران [۱۰] پس از بررسی سازوکار تشکیل ترکیب  $Ti_2Al$  در مخلوط پودری متشکل از تیتانیوم و آلومینیوم در دماهای بالاتر از دمای ذوب آلومینیوم، نشان دادند که آلومینیوم ذوب شده و تیتانیوم را احاطه می‌کند. پس از آن ترکیب  $Al_3Ti$  تشکیل شده و درصد آن تا مصرف تمام آلومینیوم موجود افزایش می‌یابد. لئو و آکوف [۱۱] با ایجاد زوج نفوذی متشکل از لایه‌های تیتانیوم و آلومینیوم از طریق نورد و عملیات حرارتی نفوذی به این نتیجه رسیدند که ترکیب بین‌فلزی  $Al_3Ti$ ، تنها ترکیبی است که امکان تشکیل آن در فصل مشترک اتصال وجود دارد. یانگ و همکاران [۱۲] نیز با انجام عملیات حرارتی زوج نفوذی آلومینیوم-تیتانیوم این مطلب را تأیید می‌کند که تنها امکان تشکیل ترکیب بین‌فلزی  $Al_3Ti$  در فصل مشترک اتصال وجود دارد. از دیگر فعالیت‌های تحقیقاتی قابل ذکر در این زمینه، فعالیت یانگ و همکاران [۱۳] و همچنین طاووسی و همکاران [۱۴] قابل توجه است.

با توجه به مطالب مطرح، در این تحقیق تلاش بر این بوده تا شکل‌گیری ترکیب بین‌فلزی  $Al_3Ti$  در فصل مشترک اتصال آلومینیوم و تیتانیوم مورد بررسی واقع شود. در این رابطه در ابتدا زوج نفوذی متشکل از آلومینیوم و تیتانیوم از طریق رسوب‌گذاری آلومینیوم خالص بر سطح تیتانیوم از طریق فرایند جوشکاری تیگ ایجاد و در ادامه با انجام عملیات حرارتی نفوذی، فصل مشترک اتصال مورد بررسی واقع شده است.

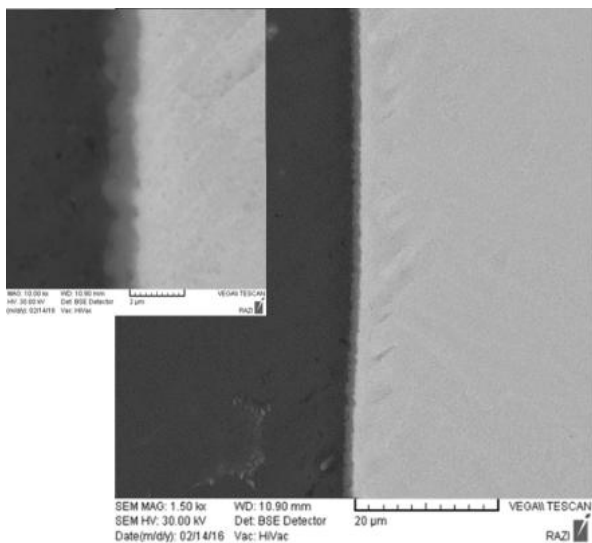
## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق، از ورق تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت ۲ میلی‌متر به‌عنوان زیرلایه و از سیم‌جوش آلومینیوم خالص ۱۱۰۰ با قطر ۲ میلی‌متر به‌عنوان فلز پوشش بهره گرفته شد و جهت انجام فرایند پوشش‌دهی از روش جوشکاری تیگ پالسی استفاده شد. در تمامی جوشکاری‌ها، میزان هم‌پوشانی ۵۰ درصد، شدت جریان حداکثر و حداقل به ترتیب ۷۵ و ۳۵ آمپر، ولتاژ قوس ۱۰ ولت، سرعت جوشکاری ۰/۱۵-۰/۲ سانتی‌متر بر ثانیه و زمان پالس ۰/۳ ثانیه ثابت در نظر گرفته شد [۱۴] و [۱۵]. پس از تهیه زوج نفوذی، فرایند عملیات حرارتی نفوذی در محدوده دماهای ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در اتمسفر آرگون و در مدت زمان‌های مختلف دنبال شد.

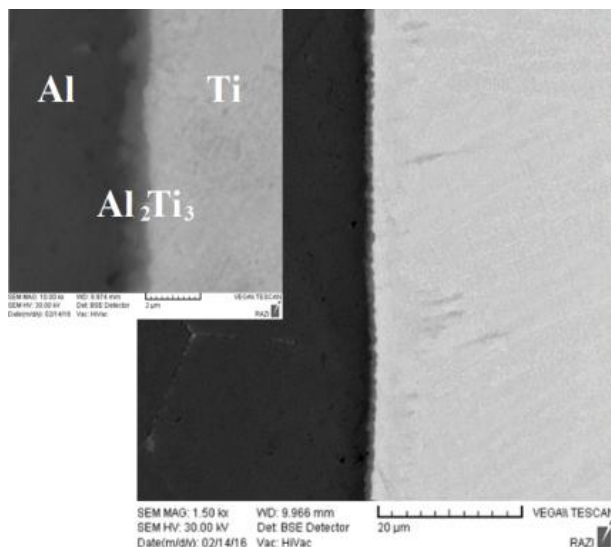
آزمون پراش‌سنجی پرتوی ایکس<sup>۱</sup> با استفاده از دستگاه مدل X'Pert Pro MPD ساخت شرکت Panalytical هلند انجام شد. تیوب پرتو ایکس مورد استفاده از نوع مسی، ولتاژکاری ۴۰ کیلوولت، جریان ۲۵ میلی‌آمپر و اندازه گام ۰/۰۳ درجه انتخاب شد. بررسی‌های ساختاری نمونه‌های حاصل از جوشکاری، توسط میکروسکوپی نوری<sup>۲</sup> مدل BH2-UMA و میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۳</sup> مدل Mira 3-XMU انجام شد. شایان ذکر است که برای انجام بررسی‌های ساختاری، تمامی نمونه‌های در محلول اچ ماکرو آلومینیوم به مدت زمان ۱۰ ثانیه اچ شدند.

## ۳- نتایج و بحث

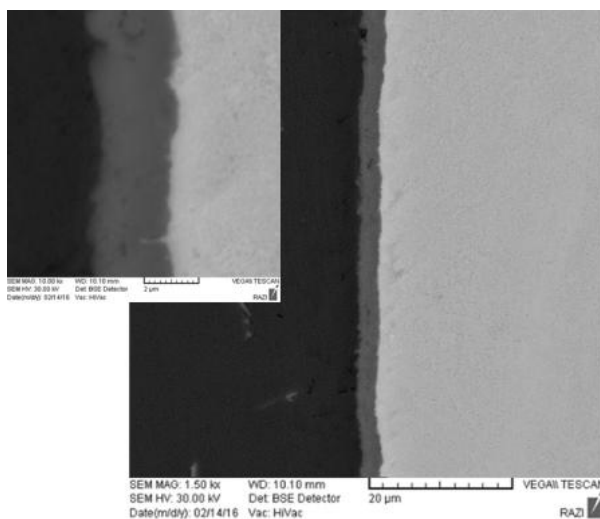
تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از محل اتصال آلومینیوم



(ب)



(ف)

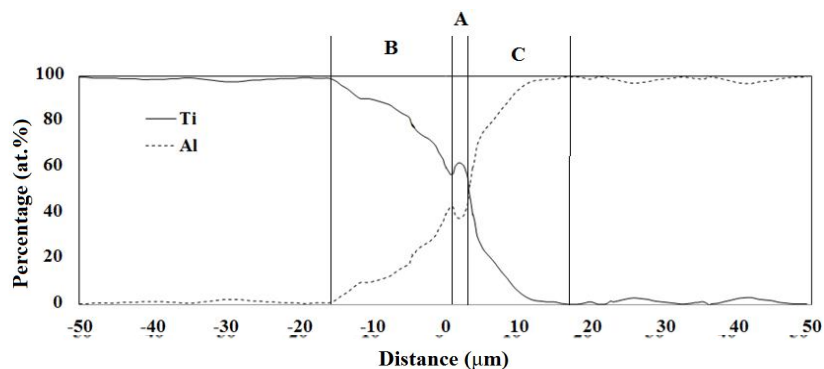


(ج)

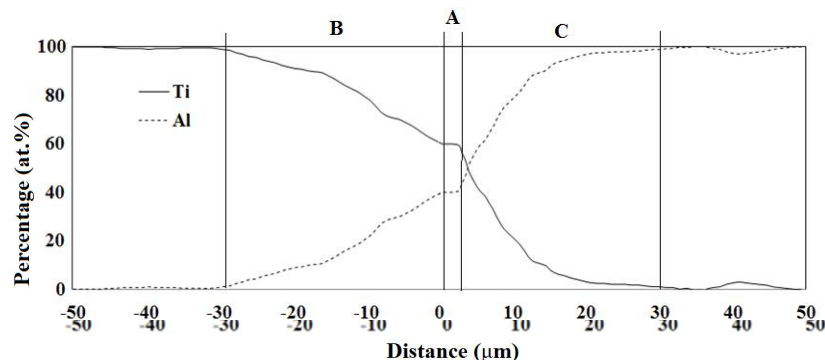
شکل ۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از زوج نفوذی آلومینیوم- تیتانیوم پس از انجام رسوب گذاری توسط فرایند تیگ و انجام فرایند عملیات حرارتی نفوذی در دمای  $550^{\circ}$  درجه سانتی گراد به مدت زمان‌های: الف) صفر، ب) ۱۰ و ج) ۲۰ ساعت

عنصری خطی برای تعیین ترکیب شیمیایی این فاز استفاده شد که نتیجه آن در شکل (۲-الف) قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ترکیب این لایه بسیار نزدیک به ترکیب بین فلزی  $Al_2Ti_3$  است. این ترکیب بین فلزی، یک ترکیب ناپایدار در میان آلومینیدهای تیتانیوم است که تنها در شرایط غیرتعادلی ایجاد می‌شود. در راستای اثبات این موضوع، تغییرات انرژی آزاد گیبس تشکیل ترکیب‌های بین فلزی  $Al_2Ti$ ،  $TiAl$ ،  $TiAl_3$  و  $Al_2Ti_3$  که امکان تشکیل آنها در زوج نفوذی

و تیتانیوم پس از انجام فرایند رسوب گذاری و عملیات حرارتی نفوذی در دمای  $550^{\circ}$  درجه سانتی گراد به مدت زمان‌های مختلف در شکل (۱) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۱-الف) مشاهده می‌شود، با انجام فرایند جوشکاری تیگ، اتصال متالورژیکی مناسبی میان آلومینیوم و تیتانیوم ایجاد شده و لایه‌ای ظریف از فاز جدید با ضخامت در حدود یک میکرومتر در فصل مشترک اتصال به وجود آمده است. با توجه به ضخامت بسیار کم لایه مورد نظر، از آنالیز



(الف)



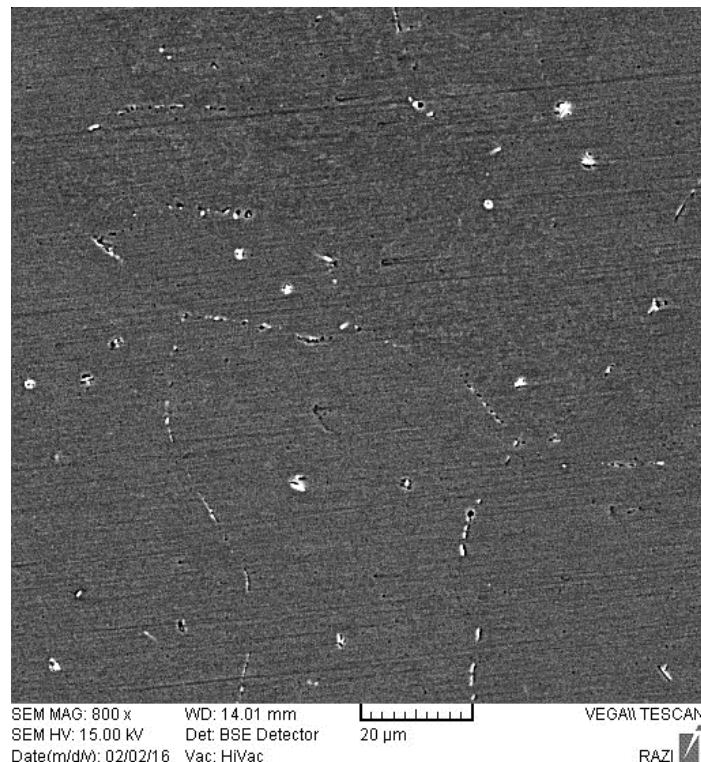
(ب)

شکل ۲- آنالیز عنصری خطی در فصل مشترک ناحیه اتصال آلومینیوم- تیتانیوم پس از انجام رسوب‌گذاری توسط فرایند تیگ و انجام فرایند عملیات حرارتی نفوذی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های: الف) صفر و ب) ۱۰ ساعت

برخلاف گزارش‌های ارائه شده توسط اورا و همکاران [۱۰]، لو آکوف [۱۱]، یانگ و همکاران [۱۲] است. این محققین بر این اعتقاد هستند که ترکیب بین‌فلزی  $Al_7Ti_3$  تنها ترکیب بین‌فلزی است که امکان تشکیل آن در فصل مشترک اتصال آلومینیوم و تیتانیوم وجود دارد. نکته دیگر قابل توجه در شکل (۲- الف)، نفوذ جزئی آلومینیوم در تیتانیوم و تیتانیوم در آلومینیوم است. وسعت این نواحی که به ترتیب با حروف B و C در این شکل نامگذاری شده است، به ترتیب معادل ۱۶ و ۱۸ میکرومتر است. مطابق تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از فصل مشترک اتصال پس از انجام عملیات حرارتی نفوذی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۱۰ ساعت (شکل ۱- ب) و برخلاف

آلومینیوم/تیتانیوم وجود دارد، در مراجع مختلف [۱۴ و ۱۵] ارائه شده است.

مطابق اطلاعات موجود، مقادیر تغییرات انرژی آزاد گیبس تشکیل تمامی ترکیب‌های مورد بحث منفی است. از این جهت می‌توان گفت که از دیدگاه ترمودینامیک امکان تشکیل هر چهار نوع ترکیب در یک زوج نفوذی وجود دارد. البته کمترین مقدار تغییرات انرژی آزاد گیبس تشکیل مربوط به فاز  $Al_7Ti_3$  بوده، این موضوع نیز مبین آن است که فاز  $Al_7Ti_3$  از پایداری ترمودینامیکی کمتری نسبت به فازهای دیگر برخوردار است و تشکیل آن در حین فرایند اتصال تنها می‌تواند به شرایط غیرتعادلی حاکم بر فرایند نسبت داده شود [۱۵]. این موضوع



شکل ۳- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نفوذ اتم‌های تیتانیم در مرز دانه‌های آلومینیوم

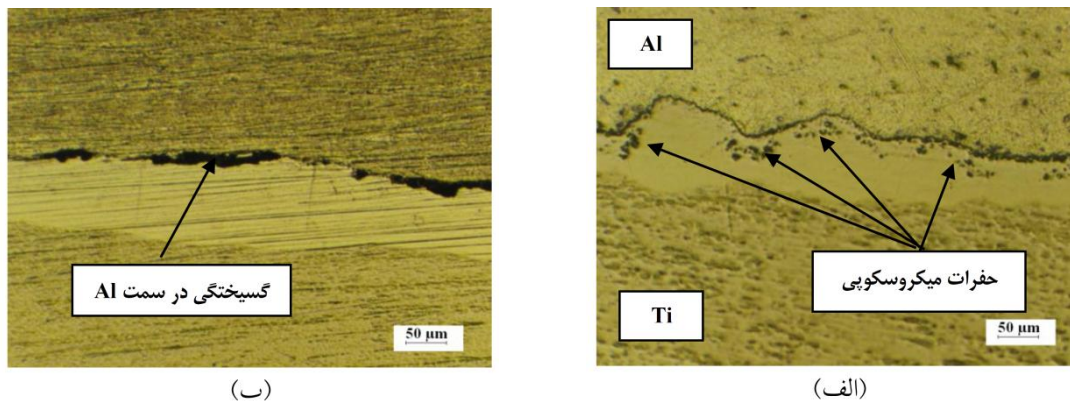
بوده و ضخامت آن تقریباً برابر یک میکرومتر است. برخلاف ضخامت و ترکیب لایه فصل مشترک، ضخامت نواحی نفوذی در مناطق غنی از آلومینیوم و تیتانیم افزایش یافته به گونه‌ای که ضخامت ناحیه B و C به ترتیب به حدود ۳۰ و ۲۸ میکرومتر رسیده است.

در این شرایط به نظر می‌رسد که نفوذ اتم‌های آلومینیوم و تیتانیم به داخل ناحیه فصل مشترک انجام گرفته و این لایه، تنها به عنوان یک لایه واسط عمل کرده است. در واقع خروج اتم‌های آلومینیوم و تیتانیم از لایه بین‌فلزی حاصل هم‌زمان با رسوب این اتم‌ها به داخل فصل مشترک در حین انجام عملیات حرارتی نفوذی، دلیل اصلی عدم رشد این لایه است.

بررسی‌های صورت گرفته حاکی از آن است که سازوکار اصلی نفوذ در این شرایط، نفوذ از طریق مرز دانه‌ها است. این موضوع با توجه به تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ناحیه لایه آلومینیوم که در شکل (۳) آورده شده است، قابل اثبات است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نفوذ

انتظار، با انجام عملیات حرارتی ضخامت لایه ترکیب بین‌فلزی حاصل در فصل مشترک اتصال تقریباً ثابت مانده و تغییر چندانی نکرده است. این موضوع برخلاف مطالعات انجام شده توسط محققین است که عنوان کرده‌اند انجام عملیات‌های حرارتی طولانی مدت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند منجر به افزایش ضخامت لایه بین‌فلزی حاصل در فصل مشترک شود.

به منظور تعیین نوع ترکیب بین‌فلزی موجود در فصل مشترک و همچنین علت ثابت ماندن ضخامت لایه بین‌فلزی مورد نظر، آنالیز عنصری خطی انجام شد. به عنوان نمونه، نتیجه آنالیز عنصری خطی مربوط به نمونه عملیات حرارتی شده به مدت ۱۰ ساعت در شکل (۲-ب) قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدت زمان انجام عملیات حرارتی نفوذی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۱۰ ساعت، ترکیب و ضخامت لایه بین‌فلزی حاصل در فصل مشترک ثابت باقی مانده است. در این حالت ترکیب شیمیایی فاز بین‌فلزی حاصل در فصل مشترک بسیار نزدیک به  $Al_2Ti_3$



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی نوری از فصل مشترک اتصال زوج آلومینیوم- تیتانیوم پس از انجام عملیات حرارتی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد به مدت زمان‌های: الف) ۲۰ و ب) ۵۰ ساعت

عنصری نقطه‌ای در مورد این لایه انجام و نتایج آن نشان داد که ترکیب شیمیایی فصل مشترک در این حالت بسیار نزدیک به فاز بین‌فلزی  $Al_3Ti$  است. در واقع، مطالعات ترمودینامیکی انجام شده نیز نشان می‌دهد که در تمامی محدوده‌های دمایی تغییرات انرژی آزاد گیبس تشکیل  $Al_3Ti$  از فازهای دیگر منفی‌تر است. از این رو پس از برقراری شرایط نفوذی پایدار، اولین فازی که در فصل مشترک تیتانیوم و آلومینیوم تشکیل می‌شود،  $Al_3Ti$  است. این موضوع توسط سایر محققین نیز تأیید شده است [۲، ۵ و ۷].

پس از فهم دقیق سازوکار تشکیل و رشد ترکیب حاصل در فصل مشترک اتصال زوج نفوذی آلومینیوم- تیتانیوم، فرایند عملیات حرارتی نفوذی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در مدت زمان‌های مختلف انجام و تلاش شد تا ساختار حاصل مورد بررسی واقع شود. در این رابطه، تصاویر میکروسکوپی نوری از زوج نفوذی مورد نظر پس از انجام عملیات حرارتی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های مختلف در شکل (۴) ارائه شده است. بنابر انتظار با افزایش دما، نرخ رشد لایه بین‌فلزی  $Al_3Ti$  در فصل مشترک زوج نفوذی آلومینیوم- تیتانیوم افزایش یافته و در مدت‌های اولیه به حدود ۵ میکرومتر رسیده است. مطابق آنچه در مورد دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد ذکر شد، در این حالت نیز نرخ رشد لایه در زمان‌های اولیه

اتم‌های تیتانیوم از طریق مرزدانه‌های آلومینیوم، باعث غنی شدن مرزها از این عنصر و تشکیل رسوبات با رنگ روشن در مرزها شده است. مطابق آنالیزهای عنصری صورت گرفته، این رسوبات با توجه به آنالیز پراش پرتو ایکس به ترکیب بین‌فلزی  $Al_3Ti$  نسبت داده می‌شود. البته ناهمواری لایه بین‌فلزی حاصل در فصل مشترک نیز می‌تواند تأکیدی بر نحوه انجام نفوذ مرزدانه‌ای باشد. به این ترتیب که نفوذ از میان مجراهای مرزدانه با سرعت بیشتری صورت گرفته و این مناطق خود را به صورت ناهمواری‌هایی در فصل مشترک نشان می‌دهند.

با ادامه عملیات حرارتی نفوذی در زمان‌های طولانی‌تر، انتظار بر این است که با غنی شدن مرزدانه‌ها در نواحی نفوذی، نرخ خروج عناصر تیتانیوم و آلومینیوم از لایه فصل مشترک کاهش و با انباشته شدن عناصر تیتانیوم و آلومینیوم در این لایه، شرایط برای رشد آن فراهم شود. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از فصل مشترک اتصال پس از انجام عملیات حرارتی نفوذی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۲۰ ساعت در شکل (۱-ج) قابل مشاهده است. مطابق انتظار ضخامت لایه نفوذی در این زمان از یک میکرومتر به حدود سه میکرومتر افزایش یافته است که در تأیید موارد ذکر شده است. در ضمن ناهمواری‌های فصل مشترک نیز به مقدار زیادی از بین رفته است. به منظور تعیین ترکیب شیمیایی لایه مورد نظر، آنالیز

منجر به تشکیل حفرات ماکروسکوپی شوند. در این رابطه تصویر میکروسکوپی نوری از زوج نفوذی مورد نظر پس از انجام فرایند عملیات حرارتی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۵۰ ساعت به ترتیب در شکل (۴-ب) قابل مشاهده است. با توجه به این شکل، پس از گذشت ۵۰ ساعت از زمان فرایند، حفرات به یکدیگر پیوسته و منجر به جدایش کامل اتصال فصل مشترک با آلومینیوم شده‌اند. با جدا شدن فصل مشترک اتصال از بخش غنی از آلومینیوم، فصل مشترک به‌عنوان یک لایه غنی از آلومینیوم عمل کرده و به این ترتیب با نفوذ آلومینیوم از لایه مورد نظر به سمت تیتانیوم خالص، ضخامت این لایه کاهش می‌یابد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چگونگی شکل‌گیری ترکیب بین‌فلزی  $Al_3Ti$  در فصل مشترک اتصال آلومینیوم-تیتانیوم بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که اولین فاز بین‌فلزی که در فصل مشترک اتصال آلومینیوم و تیتانیوم و پس از انجام فرایند رسوب‌گذاری ایجاد می‌شود، ترکیب بین‌فلزی  $Al_3Ti_2$  است. با انجام عملیات حرارتی و اشباع شدن مرزدهانه‌های زمینه از عناصر آلیاژی، نرخ رسوب این عناصر در فصل مشترک افزایش یافته و در این حالت شرایط برای شکل‌گیری فاز بین‌فلزی پایدار  $Al_3Ti$  فراهم می‌شود. تشکیل حفرات کرکندال در فصل مشترک آلومینیوم و لایه بین‌فلزی  $Al_3Ti$  به دلیل نرخ بالاتر نفوذ آلومینیوم در لایه و به طبع آن نرخ بالاتر نفوذ جاهای خالی به سمت لایه آلومینیوم اجتناب‌ناپذیر است. پیوستن حفرات میکروسکوپی ایجاد شده در فصل مشترک، منجر به جدایش لایه آلومینیوم شده و به این ترتیب زوج نفوذی مورد نظر از بین خواهد رفت. در این حالت نه تنها لایه بین‌فلزی ایجاد شده رشد نمی‌کند، بلکه با نفوذ اتم‌های آلومینیوم از این لایه به سمت تیتانیوم، از ضخامت آن کاسته می‌شود.

فرایند بسیار محدود بوده، به‌گونه‌ای که ضخامت لایه پس از ۱۰ ساعت آنیل به حدود ۱۰ میکرومتر می‌رسد. در این مورد نیز به نظر می‌رسد لایه مورد نظر در این دما نیز به‌عنوان یک لایه واسط عمل کرده و نرخ انباشتگی اتم‌های تیتانیوم و آلومینیوم در آن بسیار کند است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ رشد لایه پس از گذشت ۲۰ ساعت از فرایند به شدت افزایش یافته و ضخامت آن به حدود ۵۰ الی ۷۰ میکرومتر رسیده است. در این حالت نیز غنی شدن مناطق نفوذی در خارج از فصل مشترک و افزایش نرخ رسوب اتم‌های آلومینیوم و تیتانیوم در فصل مشترک، دلیل اصلی افزایش ناگهانی ضخامت لایه مورد نظر است. نکته مهم و قابل ذکر در شکل (۴-الف)، تشکیل حفرات ریز میکروسکوپی در لایه فصل مشترک و نزدیک به بخش آلومینیوم در زوج نفوذی است. تشکیل این حفرات با انجام عملیات حرارتی براساس سازوکار نفوذ دوگانه اتم‌های جانشین و یا اثر کرکندال قابل توجیه است. بنابر تئوری اثر کرکندال، نرخ نفوذ عنصر با دمای ذوب پایین‌تر در زوج نفوذی بالاتر از عنصری با دمای ذوب بالاتر است [۱۵]. این موضوع نشان می‌دهد که در لایه بین‌فلزی حاصل در فصل مشترک، اتم‌های آلومینیوم و تیتانیوم به‌طور هم‌زمان نفوذ کرده تا لایه بین‌فلزی  $Al_3Ti$  رشد کند. در این حالت نرخ نفوذ اتم‌های آلومینیوم به سمت تیتانیوم بالاتر است. با توجه به اینکه اتم‌های آلومینیوم و تیتانیوم هر دو از نوع جانشین هستند، سازوکار نفوذ در آنها از نوع جای خالی است. در این صورت، نرخ نفوذ بالاتر اتم‌های آلومینیوم به سمت لایه تیتانیوم به معنی نرخ بالای نفوذ جاهای خالی به سمت لایه آلومینیوم است. در این حالت با افزایش غلظت جاهای خالی در نواحی نزدیک به لایه آلومینیوم، جاهای خالی به هم پیوسته و منجر به تشکیل حفرات میکروسکوپی تحت عنوان حفرات کرکندال می‌شوند. لازم به ذکر است که این حفرات نیز ناپایدار بوده و تمایل دارند با پیوستن به یکدیگر،

#### واژه‌نامه

1. X-ray Diffraction
2. optical microscopy

3. field emission scanning electron microscopy (FE-SEM)



1. Kuang, J. P., Harding, R. A., and Campbell, J., "Microstructures and Properties of Investment Castings of Gamma-titanium Aluminide", *Materials Science and Engineering*, Vol. A329-331, pp. 31-37, 2002.
2. Nayak, S. S., Pabi, S. K., and Murty, B. S., "Al-(L12)Al<sub>3</sub>Ti Nanocomposites Prepared by Mechanical Alloying: Synthesis and Mechanical Properties", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 429, pp. 128-133, 2010.
3. Nayak, S. S., Pabi, S. K., Kim, D. H., and Murty, B. S., "Microstructure-hardness Relationship of Al-(L12)Al<sub>3</sub>Ti Nanocomposites Prepared by Rapid Solidification Processing", *Intermetallics*, Vol. 18, pp. 487-492, 2010.
4. Naplocha, K., and Granat, K., "Microwave Activated Combustion Synthesis of Porous Al-Ti Structures for Composite Reinforcing", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 486, pp. 178-184, 2009.
5. Huashun, Y., Hongmei, C., Liming, S., and Guanghui, M., "Preparation of Al-A<sub>3</sub>Ti in Situ Composites by Direct Reaction Method", *Rare Metals*, Vol. 25, pp. 32-36, 2006.
6. Mirjalili, M., Soltanieh, M., Matsuura, K., and Ohno, M., "On the Kinetics of TiAl<sub>3</sub> Intermetallic Layer Formation in the Titanium and Aluminum Diffusion Couple", *Intermetallics*, Vol. 32, pp. 297-302, 2013.
7. Thuillard, M., Tran, L. T., and Nicolet, M. A., "Al<sub>3</sub>Ti Formation by Diffusion of Aluminium Through Titanium", *Thin Solid Films*, Vol. 166, pp. 21-27, 1988.
8. Bataev, I. A., Mali, V. I., and Pavliukova, D. V., "Structural and Mechanical Properties of Metallic-intermetallic Laminate Composites Produced by Explosive Welding and Annealing", *Materials & Design*, Vol. 35, pp. 225-234, 2012.
9. Sujata, M., Bhargava, S., Suwas, S., and Sangal, S., "On Kinetics of TiAl<sub>3</sub> Formation During Reaction Synthesis from Solid Ti and Liquid Al", *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 20, pp. 2207-2209, 2001.
10. Orru, R., Cao, G., and Munir, Z. A., "Mechanistic Investigation of the Field-activated Combustion Synthesis (FACS) of Titanium Aluminides", *Chemical Engineering Science*, Vol. 54, pp. 3349-3355, 1991.
11. Luo, J. G., and Acoff, V. L., "Using Cold Roll Bonding and Annealing to Process Ti/Al Multi-Layered Composites from Elemental Foils", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 349, pp. 164-172, 2004.
12. Yang, R., Xu, L., and Cui, Y., "Growth of Intermetallic Layer in Multi-Laminated Ti/Al Diffusion Couples", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 345, pp. 638-647, 2006.
13. Wei, Y., Aiping, W., Guisheng, Z., and Jialie, R., "Formation Process of the Bonding Joint in Ti/Al Diffusion Bonding", *Materials Science and Engineering*, Vol. 480, pp. 456-463, 2008.
14. Tavoosi, M., and Arjmand, A., "In Situ Formation of Al/Al<sub>3</sub>Ti Composite Coating on Pure Ti Surface by TIG Surfacing Process", *Surfaces and Interfaces*, Vol. 8, pp. 1-7, 2017.
15. Tavoosi, M., Arjmand, A., and Adelmoghaddam, B., "Surface Alloying of Commercially Pure Titanium with Aluminum and Nitrogen using GTAW Processing", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 311, pp. 314-320, 2017.