



تاثیر لایه واسط بر ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصال نفوذی فولاد 17-4PH و آلیاژ Ti6Al4V

علیرضا عظیمی^۱، علی خرم^{۲*}، ضیاء والفی^۳، علیرضا یزدی پور^۴

^۱ کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران

^۲ استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران

^۳ دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران

^۴ استادیار پژوهش، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تاثیر لایه واسط بر ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصال نفوذی آلیاژ Ti6Al4V و فولاد رسوب سخت شونده 17-4PH می‌باشد. برای این منظور، اتصال دوآلیاژ بدون استفاده از لایه واسط و با استفاده از لایه واسط نیکل خالص در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. ساختار مناطق اتصال با کمک میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، آنالیز عنصری و نیز نقشه توزیع پراکندگی عناصر مورد مطالعه قرار گرفت. پس از بررسی ریزساختار و میزان نفوذ، سختی و استحکام برشی اتصال نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، بدون استفاده از لایه واسط، فازهای β -Ti، λ +FeTi و σ در فصل مشترک اتصال تشکیل می‌شوند. ایجاد این ترکیبات بین فلزی سبب تردی اتصال و کاهش خواص مکانیکی می‌شود. در صورت استفاده از لایه واسط نیکل خالص، ترکیبات بین فلزی Ni_3Ti ، NiTi و NiTi_2 در فصل مشترک نیکل-تیتانیوم تشکیل می‌شوند. نیکل در قالب یک لایه از نفوذ تیتانیوم در آهن جلوگیری نموده و مانع تشکیل ترکیبات FeTi می‌شود. بیشترین میزان سختی ۵۶۲ ویکرز به دست آمد که دقیقاً بر روی ترکیبات بین فلزی قرار گرفته است. میانگین استحکام برشی در صورت استفاده از لایه واسط به میزان ۲۸۹ مگاپاسکال به دست آمد.

کلمات کلیدی: جوشکاری نفوذی، آلیاژ Ti6Al4V، فولاد 17-4PH، لایه واسط یکل خالص، ریزساختار

The effect of interlayer on the microstructural characteristic and mechanical properties of diffusion welding between 17-4PH steel and Ti6Al4V alloy

A. Azimi¹, A. Khorram^{2*}, Z. Valefi³, A. Yazdipour⁴

¹ Master of science, Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar Univ. of Technology, Tehran, Iran

² Assis. Prof., Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar Univ. of Technology, Tehran, Iran

³ Assoc. Prof., Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar Univ. of Technology, Tehran, Iran

⁴ Researcher Assis, Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar Univ. of Technology, Tehran, Iran

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of interlayer on the microstructural characteristic and mechanical properties of diffusion welding between 17-4PH precipitation hardening stainless steel and Ti6Al4V alloy. For this purpose, the bonding of two alloys without the interlayer and with the pure nickel interlayer at a temperature of 900 °C and a time of 45 minutes was investigated. The structure of joints were characterized by optical microscopy, scanning electron microscopy and energy dispersive x-ray spectroscopy. After examining the microstructure and diffusion rate, the hardness and shear strength of joints were also investigated. The results show that the β -Ti, λ + FeTi and σ phases are formed at the interface when the interlayer is not used. The formation of these intermetallic compounds causes a brittle bond and reduces the mechanical properties. When the pure nickel interlayer is used, Ni_3Ti , NiTi and NiTi_2 intermetallic compounds are formed at the nickel-titanium interface. Nickel in the form of interlayer prevents the diffusion of titanium into iron and the formation of FeTi compounds. The maximum microhardness of 562 Vickers was obtained, which is exactly on the intermetallic compounds. The average shear strength was 289 MPa if the interlayer was used.

Keywords: Diffusion Welding; 17-4PH Steel; Ti6Al4V alloy; Ni interlayer; Microstructure

۱- مقدمه

اخیرا با پیشرفت فناوری‌ها و توسعه ساخت قطعات نیاز به بکارگیری مواد با قابلیت‌ها و ویژگی‌های متفاوت مطرح شده است. این نیازمندی در برخی از کاربردهای پیشرفته مانند صنایع هسته‌ای، هوافضا و شیمیایی، استفاده از موادی را مطرح نموده که خواص و قابلیت‌های آن به هیچ وجه در قالب یک ماده به تنهایی نمی‌گنجد. قابلیت‌هایی نظیر سبکی، مستحکم بودن، مقاومت به خوردگی و حرارت زیاد، قیمت ارزان، سهولت در ماشینکاری و... از جمله ویژگی‌هایی هستند که امکان تجمع آن‌ها در یک ماده ممکن نیست. حضور دو یا چند ماده در کنار یکدیگر در قالب یک اتصال معنا می‌یابد و لذا فرآیندهای اتصال‌دهی مواد غیرمتشابه در سال‌های اخیر مورد نظر قرار گرفته است.

جوشکاری نفوذی یکی از فرآیندهای اتصال در حالت جامد است. در این فرآیند اتصال سطوح مورد نظر با اعمال فشار در دماهای لازم انجام می‌شود. در طی جوشکاری هیچ ذوبی اتفاق نمی‌افتد و فقط تغییر شکل‌های ماکروسکوپی بسیار محدودی رخ می‌دهد. در بعضی مواقع از یک ماده پرکننده برای بالابردن خواص جوش بدست آمده، در بین سطوح مورد نظر استفاده می‌شود [۱].

مشکل متالورژیکی اصلی در اتصال آلیاژ Ti6Al4V به فولاد، تشکیل ترکیبات ترد بین‌فلزی شامل TiFe و TiFe₂ است. این ترکیبات بین‌فلزی بسیار ترد در قطعات جوشکاری شده با روش‌های ذوبی، خود به خود منجر به ترک می‌شوند. می‌توان برای حل مشکلات به وجود آمده، با استفاده از لایه‌های میانی از نفوذ عناصر تیتانیوم و فولاد در یکدیگر جلوگیری کرده و در نتیجه از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی پیوسته که موجب شکست ترد می‌شوند، ممانعت نموده و استحکام اتصال را افزایش داد [۲].

برای جوشکاری غیرمتشابه تیتانیوم به فولاد می‌توان از فلزاتی از قبیل نیکل، وانادیم، مس، نایوبیوم، تانتالوم، منیزیم، آلومینیوم و نقره بعنوان فلز واسطه استفاده کرد؛ زیرا اکثر خواص این فلزات مابین تیتانیوم و فولاد است. استفاده از لایه‌های میانی با خواصی مابین دو فلز پایه می‌تواند از بوجود آمدن عیوب انقباضی در حین سرد شدن منطقه اتصال جلوگیری نماید [۳-۶].

طی تحقیقات انجام شده توسط کاندو و همکاران [۷] مشخص گردید، اتصال تیتانیوم خالص تجاری به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به وسیله جوشکاری، موجب به وجود آمدن ترکیبات بین‌فلزی شکننده در طی انجماد حوضچه مذاب می‌شود که این امر نیز منجر به کاهش خواص مکانیکی اتصال می‌گردد. در تحقیق انجام گرفته توسط علی شجاعی و همکارانش [۸] از لایه واسط ۵۰۰ میکرونی مس برای جوشکاری آلیاژ Ti6Al4V به فولاد ۳۱۶ کم‌کربن با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG و همچنین پرتو الکترونی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن لایه مسی مانع از تشکیل فازهای ترد نظیر FeTi و FeTi₂ به طور کامل نمی‌شود، اما مقدار آنها را کاهش می‌دهد. در تحقیقی که توسط شیوو و همکارانش [۹] انجام شد، اتصال بین Ti6Al4V و 17-4PH توسط روش لحیم کاری سخت مادون قرمز و با استفاده از فلز پرکننده 13Ag-8 مورد بررسی قرار گرفت.

لایه واسط نیکل و کروم به ضخامت ۱۰ میکرومتر روی فولاد 17-4PH قبل از عملیات پوشش داده شد. در این تحقیق تاثیر پوشش نیکل و کروم بر روی سطح فولاد رسوب سخت شونده 17-4PH برای جلوگیری از ایجاد فازهای بین‌فلزی Fe-Ti مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که هنگام استفاده از فیلر 13Ag-8 لایه نیکلی بطور کامل در مذاب حل می‌شود و اتصال شامل منطقه غنی از نقره، فاز غنی از مس و فازهای بین‌فلزی Ti-Cu-Ni است. بیشترین استحکام برشی ۲۳۳ مگاپاسگال در دمای ۸۵۰ درجه به مدت ۳ دقیقه حاصل شد. نمونه فولادی پوشش داده شده با کروم نیز با فیلرهای 75Ti، 25Cu-1 و 63Ag-35 تحت عملیات لحیم کاری سخت مادون قرمز قرار گرفت. ریزساختار سمت فولاد رسوب سخت شونده شامل زمینه غنی از نقره و فازهای بین‌فلزی TiCu و Ti₂Ti بود. قوس و همکاران [۱۰] اتصال نفوذی بین تیتانیوم خالص و فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد برای ۳۰ تا ۱۲۰ دقیقه مطالعه نمودند. نتایج نشان می‌دهد که فازهای σ ، δ ، γ و α FeTi₂ و FeTi₄O در منطقه نفوذ وجود دارد. حداکثر استحکام پیوند ۷۱ درصد استحکام تیتانیوم به دست آمد. هی و همکاران [۱۱] جوشکاری نفوذی Ti6Al4V و فولاد زنگ نزن را با استفاده از لایه واسط نیکل آلیاژی به ضخامت ۳۰ میکرومتر در محدوده دمایی ۸۵۰ تا ۸۸۰ درجه سانتیگراد در زمان‌های ۱۰ تا ۲۰ دقیقه تحت بار ۱۰ تا ۱۵

به داخل لایه واسط برنج مشاهده می‌شود. کومار و همکاران [۱۶] از جوشکاری نفوذی برای اتصال آلیاژ Ti6Al4V و فولاد 304L با لایه میانی مس استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر سختی محل اتصال ۷۰۰ ویکرز و حداکثر استحکام برشی اتصال ۲۸۲ مگا پاسکال به دست می‌آید. رانجان کومارو و همکارانش [۱۷] از روش جوشکاری نفوذی برای اتصال بین آلیاژ تیتانیوم (Ti-5Al-2.5Sn ELI) و فولاد زنگ نزن آستنیتی (فولاد ۳۲۱) در دماهای بین ۷۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد استفاده نمودند.

آنها تاثیر تغییرات دما، زمان و فشار را بر روی ریزساختار، سختی و استحکام برشی اتصال بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که چهار لایه در سطح مشترک تشکیل می‌شود که شامل فازهای بین فلزی σ ، χ ، FeTi + Fe_2Ti و λ + β -Ti است. عرض این لایه‌ها با افزایش دما و زمان افزایش می‌یابد. حداکثر استحکام برشی ۳۴۸ مگاپاسکال در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد به دست می‌آید. آتاسوی و همکارانش [۱۸] صفحات تیتانیوم و فولاد کم کربن را با استفاده از روش جوشکاری نفوذی و لایه واسط نقره در زمان‌ها و دماهای متفاوت به هم متصل نمودند و تاثیر این تغییرات را روی استحکام اتصال و سختی بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر استحکام اتصال در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ۹۰ دقیقه به دست می‌آید؛ همچنین حداکثر مقدار سختی در لایه میانی به دست می‌آید. اتصال نفوذی بین تیتانیوم خالص تجاری و فولاد زنگ نزن (فولاد ۳۰۴) با استفاده از لایه میانی مس توسط کاندو و همکارانش [۱۹] مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایشات در محدوده دمایی ۸۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد به مدت زمان ۱/۵ ساعت تحت فشار ۳ مگاپاسکال در حلال انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که لایه‌های واکنش متفاوتی در ناحیه نفوذ تشکیل می‌شود و حداکثر استحکام ۳۱۸ مگاپاسکال در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد به دست می‌آید.

سورندار و همکارانش [۲۰] از روش فاز مایع گذرا برای اتصال فولاد زنگ نزن ۳۱۶ به آلیاژ Ti6Al4V با استفاده از لایه‌های میانی مس و نیکل به طور همزمان استفاده نمودند و تأثیر دمای اتصال (۹۵۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد) را بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال مطالعه نمودند. نتایج نشان می‌دهد که فازهای یوتکتیک و ترکیبات بین فلزی مختلفی در سطح مشترک تشکیل می‌شوند. هر چه دمای اتصال به بالاتر

مگاپاسکال بررسی نمودند. نتایج حاکی از آن است که حداکثر استحکام برشی ۱۴۸ مگاپاسکال به دست می‌آید. کاندو و همکارانش [۱۲] اتصال نفوذی Ti6Al4V و فولاد 17-4PH را با استفاده از لایه واسط نیکل آلیاژی به ضخامت ۱۵۰ میکرومتر در محدوده دمایی ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۵ دقیقه و نیز دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه تحت بار ۵ مگاپاسکال و در فشار خلاء 10^{-4} -۵ مگاپاسکال مطالعه نمودند.

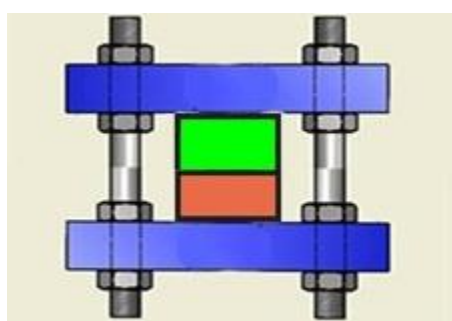
نتایج نشان می‌دهد که نفوذ در فصل مشترک اتصال به خوبی اتفاق افتاده است و در نمونه‌های با دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و در زمان بیش از ۳۰ دقیقه پهنای منطقه میانی به دلیل نفوذ اتم‌ها از دو سمت افزایش یافته است؛ همچنین ترکیبات بین فلزی Ti_2Ni ، Ni_3Ti و TiNi در فصل مشترک تشکیل می‌شوند که با افزایش دما و زمان واکنش میزان آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. سم و همکاران [۱۳] اتصال نفوذی Ti6Al4V و فولاد زنگ نزن میکروداپلکس را با استفاده از لایه واسط نیکل آلیاژی به ضخامت ۱۵۰ میکرومتر در محدوده دمایی ۸۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۵ دقیقه و تحت بار ۴ مگاپاسکال در حلال مطالعه نمودند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیبات بین فلزی Ti_2Ni ، Ni_3Ti و TiNi در فصل مشترک تیتانیوم-نیکل تشکیل می‌شوند، اما هیچ گونه ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک فولاد-نیکل تشکیل نمی‌شوند. حداکثر استحکام برشی ۴۱۵ مگاپاسکال در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه به دست آمد.

کاندو و همکاران [۱۴] ریز ساختار و خواص استحکامی اتصال نفوذی Ti6Al4V و فولاد زنگ نزن میکروداپلکس را بدون استفاده از لایه واسط و با استفاده از لایه واسط نیکل آلیاژی بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد، حداکثر استحکام برشی ۴۰۵ مگاپاسکال برای اتصال مستقیم به دست می‌آید، در حالیکه در صورت استفاده از لایه واسط نیکل آلیاژی، حداکثر استحکام برشی به ۴۷۹ مگاپاسکال افزایش خواهد یافت. ویگرامان [۱۵] از لایه واسط برنج برای اتصال آلیاژ Ti6Al4V و فولاد 304L استفاده نمودند. جوشکاری نفوذی در دماهای مختلف ۸۷۵، ۹۰۰ و ۹۲۵ درجه سانتیگراد و زمان‌های ۲۰ و ۴۰ دقیقه انجام پذیرفت. نفوذ عناصر مس و قلع از لایه واسط برنج در داخل فلز پایه و عناصر تیتانیوم، آهن، کروم، آلومینیوم، نیکل، منگنز، سیلیسیوم و کربن از فلزات پایه

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti6Al4V

Ti	Al	V	Fe	C	O
Balanced	۶/۱	۳/۹	۰/۲	۰/۰۸	۰/۱

بعد از انجام برشکاری و آماده‌سازی نمونه‌های اولیه، فیلم‌های اکسیدی موجود بر روی سطوحی از نمونه‌ها که در معرض اتصال قرار می‌گیرند با استفاده از سمباده ۴۰۰ حذف شدند. سپس سطوح نمونه‌ها تا سمباده‌ی ۲۵۰۰ پولیش شدند. بعد از عملیات سمباده‌زنی و پولیش‌کاری سطوح اتصال، نمونه‌ها در داخل استون به مدت زمان ۱۵ دقیقه تحت عملیات شستشو قرار گرفتند تا از حذف تمام آلودگی‌های سطحی اطمینان حاصل شود. پس از انجام عملیات آماده‌سازی، نمونه‌ها داخل یک فیکسچر (سیستم اعمال نیرو) قرار داده شدند تا سطوح تماس کاملاً بر روی یکدیگر قرار گیرند و ثابت شوند. در شکل ۱ طرح سیستم اعمال نیرو توسط پیچ و مهره نمایش داده شده است که شامل صفحات نگه‌دارنده، پیچ‌ها، ابزار انتقال نیرو و قطعات نمونه است. به منظور اعمال فشار یکسان در سطوح نمونه‌ها و اعمال نیروی بیشتر از سیستمی شامل چهار پیچ استفاده شد. پیچ‌های ابزار توسط تورک سنج سفت شدند تا بتوان میزان گشتاور اعمالی توسط پیچ‌ها را کنترل نمود تا به میزان برابر اعمال شود. جنس فلز مورد استفاده برای ساخت این ابزار، فولاد نسوز ۴۸۴۱ انتخاب شد. به منظور ثابت نگهداشتن نمونه‌ها، در مرکز هر صفحه پله‌ای به عمق دو میلی‌متر ایجاد شد.



شکل ۱- شماتیک طرح پیچ و مهره برای اعمال نیرو در فرآیند جوشکاری نفوذی

کل مجموعه داخل کوره مافلی با حداکثر دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و هوای داخل کوره توسط پمپ‌های روتاری و نفوذی تخلیه گردید تا به فشار ۱۰^{-۵}-۱۰^{-۶} میکرومتر از طریق عملیات نورد تهیه شد.

از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد افزایش یابد، خواص مکانیکی اتصال بدتر می‌شود، به نحوی که استحکام برشی اتصال از ۳۸۵ مگاپاسکال به ۲۵۷ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. به دلیل وجود مشکلات فراوان در جوشکاری تیتانیوم و فولاد، فرآیندهای جوشکاری حالت جامد برای این دو آلیاژ بیشتر مورد استقبال قرار گرفته‌اند. از این بین، فقط فرآیند جوشکاری نفوذی برای اتصال دائم Ti6Al4V و فولاد 17-4PH مورد استفاده قرار گرفته است که یکی از دلایل آن داشتن کنترل کامل بر میزان پیشروی واکنش است که می‌تواند با استفاده دقیق از دما و زمان صورت گیرد. اطلاعات زیادی در مورد جوشکاری آلیاژ Ti6Al4V به فولاد 17-4PH وجود ندارد؛ بنابراین در این مقاله به بررسی متالورژیکی و تکنولوژیکی اتصال دهی آلیاژ Ti6Al4V به فولاد 17-4PH پرداخته می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر لایه واسط نیکل خالص بر ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصال نفوذی فولاد رسوب سخت شونده 17-4PH و آلیاژ Ti6Al4V است. براساس مطالعات انجام شده، تاکنون از لایه واسط نیکل آلیاژی برای اتصال Ti6Al4V و فولاد 17-4PH استفاده شده است. وجود عناصر کروم و آهن در لایه واسط نیکل آلیاژی می‌تواند به تشکیل فازهای ترد پیچیده‌تر در فصل مشترک کمک کند؛ زیرا قابلیت انحلال جامد کروم، آهن، نیکل و تیتانیوم در یکدیگر محدود است. به همین دلیل در این پژوهش از نیکل خالص به عنوان لایه واسط استفاده شده است.

۲- انجام آزمایشات

مواد اولیه شامل یک میلگرد فولاد 17-4PH و یک میلگرد Ti6Al4V به قطر ۲۰ میلی‌متر بود که از هر یک تعدادی نمونه به طول یک سانتی‌متر توسط دستگاه تراش تهیه شد. در جداول ۱ و ۲ ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti6Al4V و فولاد 17-4PH به ترتیب ارائه شده است. برای جلوگیری از نفوذ مستقیم آهن و تیتانیوم در یکدیگر، فویل نیکل خالص به ضخامت ۱۵۰ میکرومتر از طریق عملیات نورد تهیه شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد 17-4PH

Fe	Cr	Ni	P	Si
Balanced	۱۶/۵	۴/۲	۰/۰۳	۰/۹۳
C	S	Cu	Mn	
۰/۰۷	۰/۰۲	۴/۱۲	۰/۸۲	

۳- بحث و نتایج

۳-۱- بررسی ساختاری فصل مشترک بدون استفاده از لایه واسط

در شکل ۲ تصویر فصل مشترک اتصال ایجاد شده بدون استفاده از لایه واسط نمایش داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، دما به گونه ای انتخاب شده است که انرژی لازم جهت نفوذ اتم‌ها در زمان ۴۵ دقیقه تامین شود و اتصال بصورت کامل و بدون حفره و فاصله‌ای بین دو فلز پایه بصورت سرتاسری ایجاد شده است. این تصویر بیانگر این موضوع است که در دمای ۹۰۰ درجه و در زمان‌های ابتدایی فرآیند جوش نفوذی، پستی و بلندی‌های سطوح بخوبی دچار خزش شده تا تماس کامل بین دو فلز پایه ایجاد شود تا شرایط برای نفوذ عناصر طرفین در یکدیگر فراهم گردد.

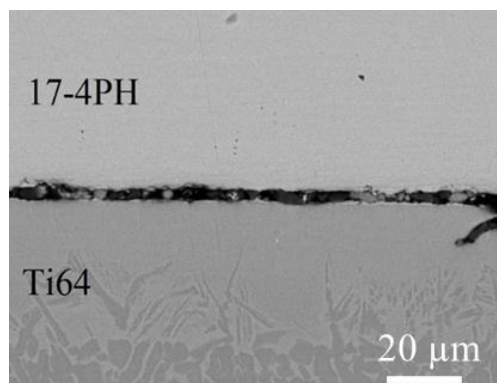
با مناسب بودن دو عامل نفوذ یعنی دما و زمان، عناصر در سرتاسر فصل مشترک نفوذ کرده تا اتصال کامل ایجاد شود. گواه این موضوع شکل ۲ ب است که تصویر اچ شده این اتصال شامل ساختار اتصال دو فلز پایه را نشان می‌دهد. در این شکل کاملاً واضح است که تغییرات ساختاری در فصل مشترک و در قسمت آلیاژ تیتانیومی رخ داده و ساختارهای ویدمن اشتاتن ایجاد شده است؛ همچنین مشخص است که در قسمت فولاد 17-4PH، لایه‌های بسیار باریکی درست بالای فصل مشترک تشکیل شده‌اند که چیزی جز نفوذ نمی‌تواند علت این موضوع باشد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، علت اصلی اتصال که نفوذ عناصر است، بصورت موفق آمیزی انجام شده است. مشکل اصلی جوشکاری نفوذی فولاد 17-4PH و Ti6Al4V نفوذ طرفین در یکدیگر است که سبب ایجاد ترکیبات بین فلزی ترد شده و موجب کاهش خواص مکانیکی اتصال می‌شود. همانطور که در تصویر ۲ ب مشخص است، حاصل نفوذ عناصر تیتانیوم و فولاد در یکدیگر، تشکیل فازهای جدید بصورت سرتاسری است [۷].

در شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی ناشی از کنتراست الکترون‌های برگشتی این اتصال نمایش داده شده است. قسمت تیره رنگی که بین دو فلز پایه دیده می‌شود جدایش نمی‌باشد، بلکه در اثر متالوگرافی و مراحل آماده سازی سطحی نمونه‌ها، این نواحی به دلیل داشتن سختی بالاتر و تردی بیشتر از سایر مناطق دچار شکستگی شده و از نمونه جدا شده‌اند. چنین پدیده‌ایی در تحقیقات مشابه توسط سایر محققین [۲۱] نیز

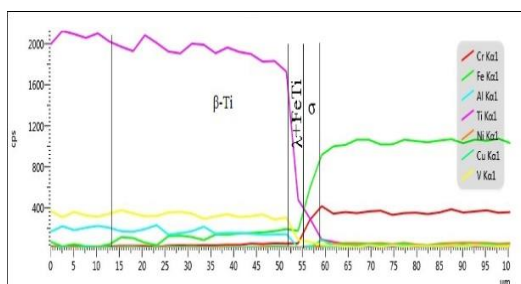
میلی بار برسد. سپس با شیب دمایی ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه دما افزایش یافت تا به دمای مورد نظر برسد. بعد از انجام فرآیند اتصال، نمونه‌ها در کوره خنک شدند. اتصال فولاد رسوب سخت شونده 17-4PH و آلیاژ Ti6Al4V توسط جوشکاری نفوذی با فشار ۵ مگا پاسکال بدون استفاده از لایه واسط و با استفاده از لایه واسط نیکل خالص در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۴۵ دقیقه انجام پذیرفت.

بعد از انجام اتصال به منظور بررسی ریز ساختار و فازهای تشکیل شده، نمونه‌ها توسط وایرکات بصورت قائم مقطع زده شدند و تحت عملیات سمباده‌زنی تا ۲۵۰۰ قرار گرفتند. به دلیل متفاوت بودن فلزات پایه، برای اچ کردن اتصال از دو ماده متفاوت استفاده شد و هر یک از فلزات پایه بصورت جداگانه اچ شدند. به همین منظور برای اچ کردن Ti6Al4V از محلول 22H₂O-2HNO₃-1HF به مدت زمان ۴۰ ثانیه و نیز برای اچ 17-4 PH از محلول 3HCl-1HNO₃ به مدت زمان ۱۰۰ ثانیه استفاده شد. برای بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. سطوح اتصال با بکارگیری کنتراست الکترون‌های برگشتی (Back Scattered Electron) مورد مطالعه قرار گرفتند؛ همچنین برای آنالیز فازها و مناطق مختلف سطوح اتصال، از دستگاه سنجش شدت انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد. مدل میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده Tescan Mira3 مجهز به EDS با حداکثر بزرگنمایی ۵۰۰۰۰ بوده است.

سختی فصل مشترک اتصال توسط دستگاه میکروسختی سنجی مدل Easy way بر مبنای ویکرز مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله طبق استاندارد ASTM E384-05 فرورونده ای از جنس الماس با بار اعمالی ۰/۰۲۵ کیلوگرم و زمان ۲۵ الی ۳۰ ثانیه مورد استفاده قرار گرفت. استحکام برشی نمونه‌های متصل شده در دمای اتاق طبق استاندارد ASTM D2295-96 ارزیابی شدند. برای این منظور هر یک از نمونه‌های تست برش بصورت استوانه‌هایی به قطر ۸ میلیمتر و ارتفاع ۱۰ میلیمتر تهیه شدند [۷]. نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط نیکل در نگهدارنده دستگاه قرار داده شدند و به فک‌های دستگاه تست کشش بسته شدند تا نیروی قائم و کششی توسط فک بصورت برشی و موازی با فصل مشترک به نمونه‌ها اعمال شود.



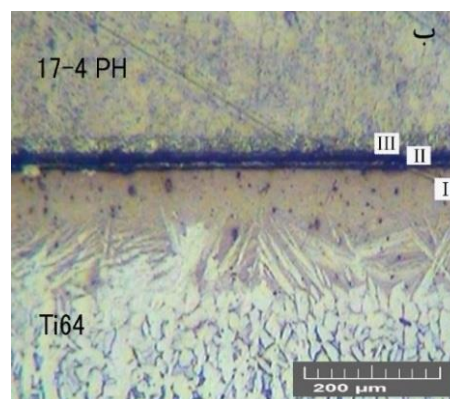
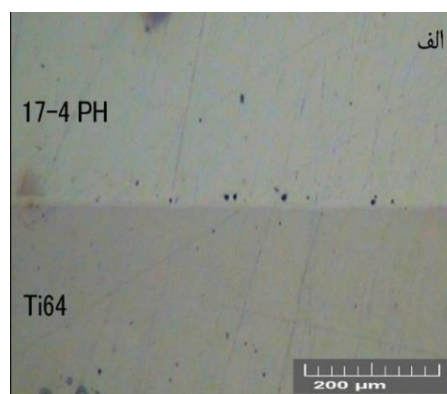
شکل ۳- تصویر میکروسکوپی الکترونی ناشی از کنتراست الکترون‌های برگشتی از اتصال مستقیم فولاد 17-4PH به Ti6Al4V



شکل ۴- نمودار تغییرات ترکیب شیمیایی در عرض اتصال ایجاد شده در اتصال مستقیم فولاد 17-4PH به Ti6Al4V

برای بررسی دقیق‌تر، عرض اتصال مورد آنالیز شیمیایی نقطه ای قرار گرفت (شکل ۵). فصل مشترک اتصال از چند لایه مختلف با ترکیبات مختلف تشکیل شده است. بر همین اساس منحنی تغییرات ترکیب شیمیایی در شکل ۴ به نواحی مختلفی تقسیم شده است و هر ناحیه معرف حضور فازها و ترکیبات خاص است. آنالیز نقاط ۲، ۱ و ۳ در جدول ۳ ارائه شده است. درصد بسیار بالای تیتانیوم و نیز وجود ۱۳ درصد آهن در نقطه ۱، بیانگر حضور فاز β -Ti است که با ناحیه I در شکل ۲ مطابقت دارد. عناصر آهن و کروم در تیتانیوم، دمای استحاله α به β را پایین آورده و سبب پایداری فاز β در دمای محیط می‌شوند که پس از سرد شدن تیتانیوم در دمای پایین‌تر از دمای یوتکتوئید $\beta \leftarrow \alpha + \beta_2$ اتفاق می‌افتد. یک ساختار لایه‌ای شکل با مورفولوژی ویدمن اشتاتن در زمینه β است [۲۲]. مقایسه نسبت درصد عناصر با سایر تحقیقات انجام شده [۲ و ۳] حاکی از حضور فاز $\lambda + \text{FeTi}$ در نقطه ۲ است که با ناحیه II در شکل ۲ مطابقت دارد. اورهان و همکاران [۲۳] گزارش

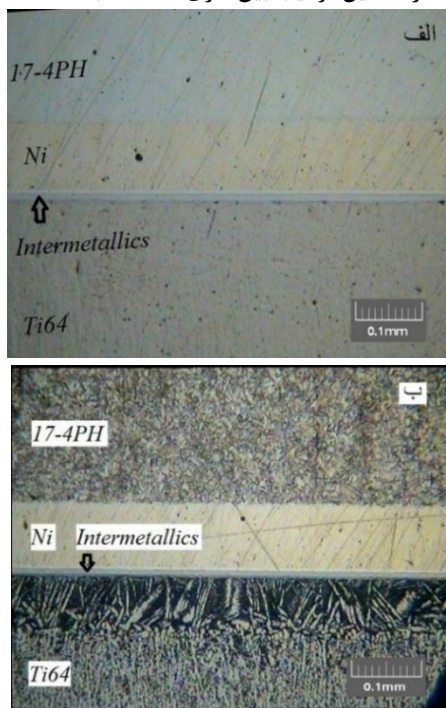
مشاهده شده است. این افزایش سختی و تردی موضعی خود دلیلی بر به وجود آمدن ترکیبات بین‌فلزی نامطلوب در این نواحی است که باید از آن جلوگیری کرد. یکی از بهترین پیشنهادها برای جلوگیری از تشکیل این ترکیبات بین‌فلزی ترد استفاده از لایه‌های واسط است.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپی نوری از اتصال مستقیم فولاد 17-4PH به Ti6Al4V با بزرگنمایی ۴۰۰x: الف) قبل از اچ کردن ب) بعد از اچ کردن.

در شکل ۴ ترکیب شیمیایی در راستای خطی عمود بر سطح اتصال مشاهده می‌شود. کاملا واضح است که نفوذ عناصر تیتانیوم، آهن، نیکل و کروم در فصل مشترک اتصال بعد از مقدار اندکی نفوذ به یکباره در حدود صفر تقلیل می‌یابند که نشان می‌دهد، اتصال به طور مناسبی ایجاد نشده است.

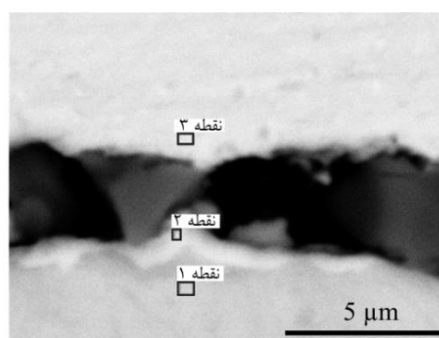
عدم شکست اتصال بعد از انجام جوشکاری نفوذی می‌گردد. این واقعیت را می‌توان به نفوذ عنصر نیکل به آلیاژ تیتانیوم و ممانعت از تشکیل ترکیب بین فلزی FeTi نسبت داد.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی نوری از اتصال دو آلیاژ Ti6Al4V و فولاد 17-4 PH همراه با لایه واسط نیکل خالص با بزرگنمایی X ۱۰۰ (الف) قبل از اچ (ب) بعد از اچ.

در شکل ۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از اتصال دو آلیاژ همراه با لایه واسط نیکل خالص نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در فصل مشترک بین لایه واسط نیکل خالص و فولاد 17-4 PH هیچ گونه ترکیب بین فلزی تشکیل نمی‌شود. فصل مشترک بین لایه واسط نیکل خالص و آلیاژ Ti6Al4V به سه ناحیه مجزا قابل تقسیم است و دقت بیشتر در این فصل مشترک، به وجود آمدن لایه‌ای جدید را نشان می‌دهد (شکل‌های ۶ و ۷)؛ همچنین عناصر آهن و نیکل بطور بسیار مناسبی در هم نفوذ کرده‌اند، به گونه‌ای که خطی واحد به عنوان فصل مشترک نیکل و آلیاژ آهنی قابل مشاهده نیست. بر طبق تحقیقات انجام شده توسط کاندو و همکارانش [۷] لایه‌های جدید پدیدار شده، ترکیبات بین فلزی هستند. این ترکیبات بین فلزی بصورت پیوسته و سرتاسری در فصل مشترک اتصال تشکیل شده و عامل اصلی افت خواص مکانیکی هستند و کاهش این ترکیبات می‌تواند رسیدن به

دادند که فاز $\lambda + \text{FeTi}$ در اتصال نفوذی بین آلیاژ تیتانیوم و فولاد زنگ نزن میکرودا بلکس مشاهده می‌شود و این فاز از دیگرام های هم دمای Fe-Cr-Ti قابل پیش بینی است. همچنین آنالیز نقطه ۳ نشان دهنده فاز σ در این محدوده می‌باشد. این لایه σ مطابقت با منطقه III مشخص شده در شکل ۲ دارد. یکی از اصلی ترین دلایل تشکیل این فاز کروم است و فاز σ نیز در نواحی غنی شده با کروم تشکیل می‌شود. تحقیقات مختلفی که بر روی تاثیر عناصر مختلف در تشکیل فاز σ صورت پذیرفته‌اند، بیان کننده این مطلب هستند که عناصری نظیر مولیبدن، تیتانیوم و وانادیم تاثیر بسزایی در تشکیل فاز σ دارند [۲ و ۳].



شکل ۵- تصویر میکروسکوپی الکترونی ناشی از کنتراست الکترون‌های برگشتی از اتصال مستقیم فولاد 17-4PH به Ti6Al4V.

جدول ۳- آنالیز نقاط نشان داده شده در شکل ۵ بر حسب

درصد وزنی							
Si	Cu	V	Al	Ni	Cr	Fe	Ti
۱/۲	۰/۹	۲/۸	۴/۳	۱	۲	۱۳/۷	۷۴
۲۳/۸	۱/۳	۰/۲	۱	۱/۷	۳	۳۲	۳۷/۶
۳/۱	۱/۷	۰/۵	۰/۲	۱/۷	۲۰/۳	۶۸/۸	۳/۸

۳-۲- بررسی ساختار فصل مشترک ایجاد شده با استفاده از لایه واسط نیکل خالص

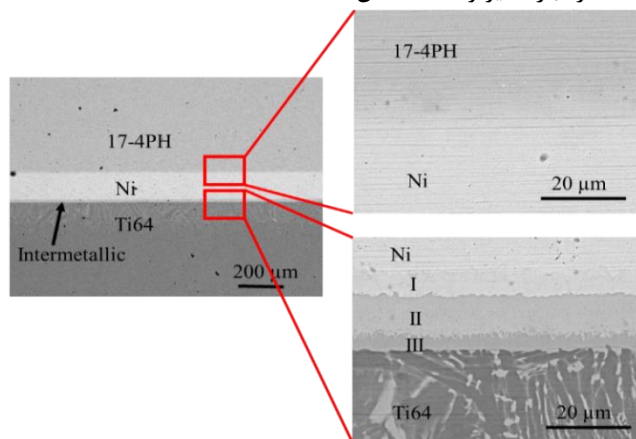
تصویر اتصال دو آلیاژ Ti6Al4V و فولاد 17-4 PH با لایه واسط نیکل خالص در شکل ۶ نمایش داده شده است. از بین رفتن تمام فضاهای خالی بین نیکل و آلیاژ تیتانیوم و همچنین نیکل و آلیاژ فولاد، نشان دهنده اتصال سرتاسری بدون هیچ جدایش و حفره است. مقایسه شکل های ۳ و ۶ نشان می‌دهد که در هنگام استفاده از لایه واسط نیکل خالص، میزان و نوع ترکیبات بین فلزی در ناحیه اتصال کاهش می‌یابد که این امر منجر به

طور که مشاهده می‌شود، درصد آلومینیوم موجود در این ناحیه بسیار بیشتر از وانادیوم است؛ اما در نقطه ۶ دقیقاً برعکس این ناحیه، عناصر β زا بسیار بیشتر از عناصر تولید کننده فاز α به چشم می‌خورند. مشاهده می‌شود، آنالیز نقطه ۸ مانند نقطه ۶ با فاز β -Ti مطابقت دارد. براساس نتایج آنالیز، درصد بسیار ناچیزی از آهن به عنوان یک عامل موثر در پایدار کردن فاز β ، در این ناحیه وجود دارد. تفاوت این ناحیه با نقطه ۶ در کم شدن عناصر β زا، با دور شدن از فصل مشترک اتصال است. نقطه ۹ همان لایه واسط نیکل بوده که کمی نفوذ عناصر آلیاژی در آن روی داده است؛ اما درست در بالای این ناحیه (نقطه ۱۰)، یک لایه ترکیبات بین فلزی به وجود آمده که به دلیل بالابودن بزرگنمایی مرز بین آن با نیکل بصورت محو بوده و قابل مشاهده نیست. در مقایسه با تحقیقات قبلی انجام شده [۷] مشخص می‌شود که این منطقه با ترکیب بین فلزی Ni₃Ti مطابقت دارد. این ناحیه در شکل ۷ با علامت I نمایش داده شده است. در شکل ۷ که نشان دهنده فصل مشترک نیکل خالص با Ti6Al4V است، این ترکیبات بین فلزی به وضوح قابل مشاهده هستند. در مجموع این ترکیبات بین فلزی شامل سه لایه مجزا بوده که طبق مطالب بیان شده لایه I شامل ترکیبات بین فلزی Ni₃Ti، لایه II شامل ترکیبات بین فلزی NiTi و لایه III شامل ترکیبات بین فلزی NiTi₂ هستند.

اتصال بهتری با خواص بالاتر را مقدور سازد. در شکل‌های ۶ ب و ۷ تغییر فاز در نزدیکی فصل مشترک نیکل و آلیاژ تیتانیوم به صورت پیوسته و سرتاسری قابل مشاهده است که نشان دهنده نفوذ موفق عناصر به صورت کاملاً سرتاسری در فصل مشترک است.

شکل ۸ نواحی آنالیز عنصری مناطق مختلفی از فازهای به وجود آمده در فصل مشترک نیکل و تیتانیوم را نمایش می‌دهد. آنالیز نقاط ۴ تا ۱۰ در جدول ۴ ارائه شده است. آنالیز نقطه ۴ با ترکیب بین فلزی NiTi مطابقت دارد. این ناحیه در شکل ۷ با علامت II نمایش داده شده است. آنالیز نقطه ۵ با ترکیب بین فلزی NiTi₂ مطابقت دارد. این ناحیه در شکل ۷ با علامت III نمایش داده شده است. با مقایسه نسبت درصد عناصر نقطه ۶ با سایر تحقیقات انجام گرفته [۳ و ۲] و به دلیل وجود درصد بسیار زیاد تیتانیوم و نیز ۲۵ درصد از عنصر نیکل که یک عامل پایدار کننده فاز β است، مشخص می‌گردد این ناحیه با فاز β -Ti مطابقت دارد؛ همچنین درصد بسیار ناچیزی از آهن در این ناحیه وجود دارد. آهن در مجاورت تیتانیوم موجب پایداری فاز β می‌شود.

مقایسه نسبت درصد عناصر موجود در نقطه ۷ با سایر تحقیقات انجام گرفته [۳ و ۲] مشخص می‌شود، این نقطه با فاز α -Ti مطابقت دارد؛ زیرا اکثر عناصر β زا در فاز کناری تجمع پیدا کرده و این فاز نسبتاً از عناصر β زا فقیرتر است. همان



شکل ۷- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از اتصال دو آلیاژ Ti6Al4V و فولاد 17-4 PH همراه با لایه واسط نیکل خالص

Ti6Al4V و فولاد 17-4 PH همراه با لایه واسط نیکل نمایش داده شده است. عناصر تیتانیوم، وانادیوم، آلومینیوم، آهن و

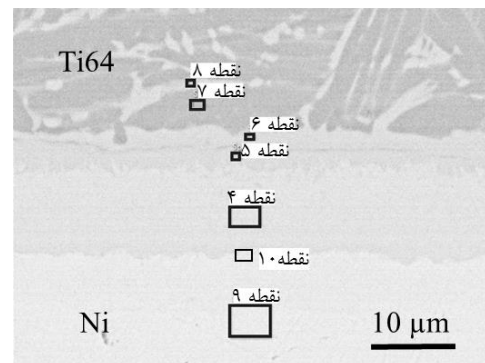
در شکل ۹ تصویرهای میکروسکوپی الکترونی روبشی و نقشه توزیع پراکندگی عناصر (map) از اتصال دو آلیاژ

جدول ۴- آنالیز نقاط نشان داده شده در شکل ۸ بر حسب

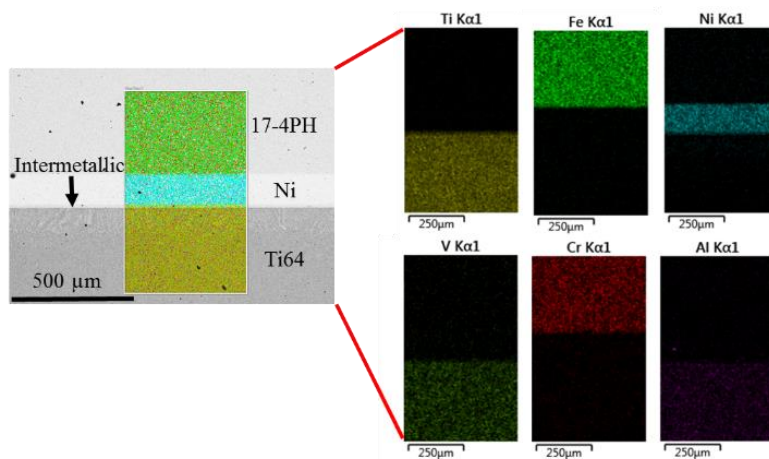
درصد وزنی					
V	Al	Ni	Fe	Ti	
-	۱/۶	۵۴/۴	۰/۳	۴۳/۷	نقطه ۴
۰/۷	۲/۱	۳۷/۳	-	۵۹/۸	نقطه ۵
۵/۵	۳/۴	۲۵/۹	۰/۴	۶۴/۹	نقطه ۶
۲/۷	۷/۸	۱/۸	-	۸۷/۷	نقطه ۷
۲/۸	۵/۰	۱۶/۸	۰/۱	۷۵/۵	نقطه ۸
-	-	۹۲/۲	-	۷/۸	نقطه ۹
		۷۴/۹		۲۵/۱	نقطه ۱۰

در این تصویر امتزاج عناصر فلزات پایه با نیکل بخوبی نمایش داده شده است که موجب اتصال نفوذی می‌شود. ضخامت لایه واکنشی در سمت آلیاژ Ti6Al4V بزرگتر از طرف فولاد است. ضخامت لایه واکنشی در سمت نیکل-تیتانیوم در حدود ۳۰ میکرومتر و در طرف نیکل- فولاد در حدود ۲۰ میکرومتر است. در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد، فولاد ساختار fcc را حفظ می‌کند، اما تیتانیوم یک تبدیل فاز از hcp به bcc را در دمای ۸۸۲ درجه سانتیگراد متحمل می‌شود.

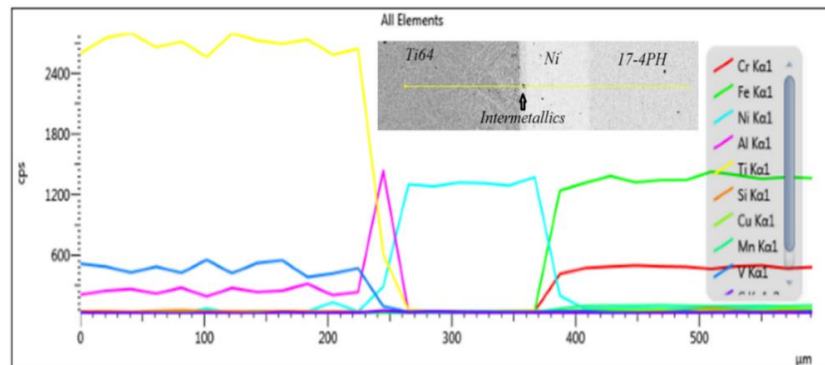
کروم در تمامی نقاط لایه واسط نیکل دیده می‌شوند که نشان دهنده نفوذ عناصر از دو طرف در تمامی نقاط فصل مشترک بطور متوازن است. در شکل ۱۰ آنالیز نقاط در امتداد یک خط عمود بر فصل مشترک اتصال نمایش داده شده است. این تصویر دلیلی دیگر بر نفوذ کامل عناصر است، به گونه‌ای که با دور شدن از فلزات پایه درصد عناصر به یکباره افت نمی‌کند و بصورت شیبی ملایم افت عناصر فلزات پایه نمایش داده شده است.



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از اتصال آلیاژ Ti6Al4V و لایه واسط نیکل خالص



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نقشه توزیع پراکندگی عناصر از ناحیه نشان داده شده به تفکیک عناصر



شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با آنالیز خطی عناصر در مقطعی از اتصال دو آلیاژ Ti6Al4V و فولاد 17-4 PH همراه با لایه واسط نیکل خالص.

و نیز نقطه‌های ۶، ۷ و ۸ در حوالی فصل مشترک لایه نیکل خالص و 17-4PH انتخاب شدند. همانطور که ملاحظه می‌شود، سختی در فصل مشترک اتصال بیشتر از فلزات پایه است که به علت حضور ترکیبات بین فلزی در سطح مشترک اتصال است. چنین حالتی در تحقیقات مشابه توسط سایر محققین [۱۸] نیز مشاهده شده است. تشکیل این ترکیبات بین فلزی با سختی بالا، عاملی منفی در اتصال محسوب می‌شود و با کاهش مقدار سختی در این ناحیه می‌توان به اتصالات مطلوب‌تری دست یافت؛ همچنین سختی در منطقه لایه واسط نیکل به دلیل نرمی و انعطاف پذیری بالای نیکل کاهش می‌یابد. در این نمودار بیشترین سختی ثبت شده مربوط به نقطه شماره ۳ (۵۶۲ ویکرز) است که دقیقاً بر روی ترکیبات بین فلزی قرار گرفته است.

برای بررسی خواص مکانیکی اتصال‌ها از استحکام برشی استفاده شد. بر این اساس نمونه‌هایی استوانه‌ای از دو آلیاژ Ti6Al4V و 17-4PH به قطر ۸ میلی متر و ارتفاع ۱۰ میلی متر تهیه گردید و سپس نمونه‌ها با استفاده از فیکسچر مخصوص تحت نیروی برشی قرار گرفتند. نتایج تست برش نشان می‌دهد که شکست برای تمامی نمونه‌ها در سطح مشترک تیتانیوم-نیکل اتفاق افتاده است. طبق نتایج بدست آمده میانگین استحکام برشی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۴۵ دقیقه به میزان ۲۸۹ مگاپاسکال است. وجود لایه واسط نیکل خالص از رسیدن و واکنش عناصر تیتانیوم و فولاد در فلزات پایه جلوگیری می‌کند و در نتیجه ترکیبات بین فلزی پایه Ti-Fe تشکیل نمی‌شود. ذکر این نکته قابل توجه است که

فاز bcc در مقایسه با فاز fcc کریستالوگرافی بازتری دارد؛ بنابراین نفوذ نیکل به داخل آلیاژ تیتانیوم راحت‌تر است [۱]؛ همچنین می‌توان دریافت که لایه میانی به خوبی و با موفقیت عمل کرده و جلوی رسیدن عناصر ناسازگار با یکدیگر مثل تیتانیوم و آهن را گرفته و در نتیجه این عناصر تقریباً با یکدیگر در منطقه مشترک تجمع ندارند. این پدیده به گونه‌ای اتفاق افتاده که فلز واسط با هر دو فلز پایه سازگاری نسبی داشته و انفصالی جلوی نفوذ را نمی‌گیرد؛ همچنین در این تصویر تجمع عنصر آلومینیوم در فصل مشترک آلیاژ Ti6Al4V و فولاد نیکلی قابل مشاهده است که می‌تواند دلیلی بر به وجود آمدن فازهای α -Ti در این ناحیه بصورت ویدمن اشتاتن باشد؛ در نتیجه می‌توان دریافت، ضخامت لایه میانی به طور مناسبی انتخاب شده است که می‌تواند بطور کامل از رسیدن و واکنش عناصر تیتانیوم و فولاد و در نتیجه تشکیل ترکیبات بین فلزی پایه Ti-Fe جلوگیری کند.

۳-۳- بررسی خواص مکانیکی اتصال

در شکل ۱۱ نتایج این آزمون سختی سنجی ارائه شده است. سختی سنجی در راستای خطی عمود بر فصل مشترک اتصال در ۹ نقطه بصورت میکرو که از سمت فلز پایه Ti6Al4V شروع شده و به سمت فلز پایه 17-4PH حرکت می‌کند، انجام شده است و نتایج بصورت ویکرز گزارش شدند. محل‌های سختی سنجی بگونه‌ای انتخاب شدند که نقاط ۱، ۵ و ۹ به ترتیب در Ti6Al4V، Ni و 17-4PH قرار گیرند؛ همچنین نقطه‌های ۲، ۳ و ۴ در حوالی فصل مشترک Ti6Al4V و لایه نیکل خالص

۲- در صورت استفاده از لایه واسط نیکل خالص، ترکیبات بین فلزی $NiTi$ ، Ni_3Ti و $NiTi_2$ در فصل مشترک نیکل-تیتانیوم تشکیل می‌شوند. نیکل در قالب یک لایه از نفوذ تیتانیوم در آهن جلوگیری نموده و مانع از تشکیل ترکیبات بین فلزی $FeTi$ می‌شود.

۳- با استفاده از لایه واسط نیکل خالص، هیچ ترکیب بین فلزی در فصل مشترک فولاد 17-4PH و نیکل مشاهده نمی‌شود و در این ناحیه، اتصال کاملاً مناسبی شکل می‌گیرد.

۴- آنالیز خطی عناصر و نقشه توزیع پراکندگی عناصر نشان می‌دهند که عناصر فلز پایه و لایه واسط در تمامی نقاط فصل مشترک بطور کامل در یکدیگر نفوذ کرده‌اند.

۵- سختی در لایه واسط نیکل به دلیل نرمی و انعطاف پذیری بالای نیکل کاهش می‌یابد؛ اما در منطقه فصل مشترک نیکل و آلیاژ $Ti6Al4V$ ، افزایش سختی به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی قابل مشاهده است. بیشترین میزان سختی ۵۶۲ و بیکرز به دست آمد که دقیقاً بر روی ترکیبات بین فلزی قرار گرفته است.

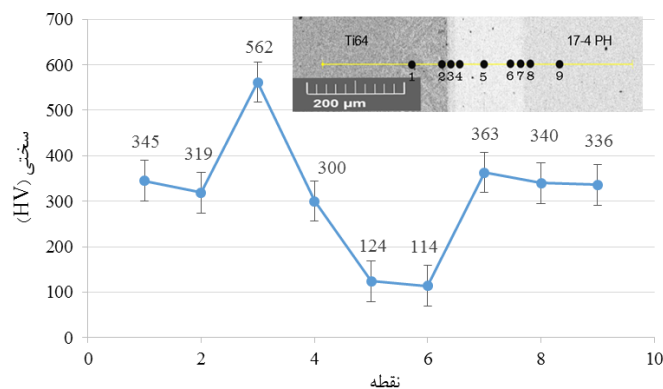
۶- میانگین استحکام برشی در صورت استفاده از لایه واسط به میزان ۲۸۹ مگاپاسکال به دست آمد.

علیرغم وجود ترکیبات بین فلزی $NiTi$ ، Ni_3Ti و $NiTi_2$ ، استحکام برشی اتصال با لایه واسط نیکل خالص در مقایسه با اتصال مستقیم فلزات غیرهمجنس به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که تاثیرات مخرب ترکیبات بین فلزی فوق کمتر از ترکیبات بین فلزی $Fe-Ti$ است. این امر منجر به افزایش استحکام برشی اتصال می‌گردد.

۴- نتیجه گیری

اتصال فولاد رسوب سخت 17-4PH و آلیاژ $Ti6Al4V$ توسط جوشکاری نفوذی با فشار ثابت ۵ مگاپاسکال بدون استفاده از لایه واسط و با استفاده از لایه واسط نیکل خالص در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه انجام پذیرفت. باتوجه به تحقیق انجام شده در این پروژه نتایج زیر بدست آمد:

- ۱- بدون استفاده از لایه واسط، فازهای $\beta-Ti$ ، $FeTi$ و λ در فصل مشترک اتصال تشکیل می‌شوند. ایجاد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک، سبب تردی اتصال و کاهش خواص مکانیکی می‌شود.



شکل ۱۱- پروفیل میکروسختی نقاط مختلف در فصل مشترک اتصال.

- [2] Kundu S, Thirunavukarasu G (2016) Structure and properties correlation of diffusion bonded joint of duplex stainless steel and Ti-6Al-4V with and without Ni-17Cr-9Fe alloy interlayer. Int Inst Weld 73: 533-549.
- [3] Thirunavukarasu G (2014) Effect of Bonding Temperature on Interfacial Reaction and Mechanical Properties of diffusion-bonded joint

مراجع

- [1] Kundu S, Sam S (2013) Diffusion Bonding of Microduplex Stainless Steel and Ti Alloy with and without Interlayer: Interface Microstructure and Strength Properties. Metall Mater Trans A 45: 371-383.

- microstructure and strength properties. Mater Des 40: 237-244.
- [14] Kundu S, Sam S, Mishra B, Chatterjee S (2014) Diffusion Bonding of Microduplex Stainless Steel and Ti Alloy with and without Interlayer: Interface Microstructure and Strength Properties. Metall Mater Trans A 45: 371–383.
- [15] Vigraman T (2021) Liquid-solid phase reaction products formation in the diffusion welded joints made between Ti-6Al-4 V and AISI304L with brass interlayer. Mater Today: Proc 42(2): 607-617.
- [16] Kumar R, Balasubramanian M (2020) Analysis and comparison of diffusion bonded and friction welded Ti-6Al-4V and stainless steel joints with copper as interlayer. Mater. Today: Proc 21(3): 1467-1473.
- [17] Ranjan Kumar R, Kumar Gupta Rohit, Sarkar A, Prasad MJNV (2022) Vacuum diffusion bonding of α -titanium alloy to stainless steel for aerospace applications: Interfacial microstructure and mechanical characteristics. Mater Charact 183: 111607.
- [18] Atasoy E, Kahramanb N (2008) Diffusion bonding of commercially pure titanium to low carbon steel using a silver interlayer. Mater Charact 59: 1481-1490.
- [19] Kundu S, Ghosh M, Laik A, Bhanumurthy K, Kale GB, Chatterjee S (2005) Diffusion bonding of commercially pure titanium to 304 stainless steel using copper interlayer. Mater Sci Eng A 407:154–160.
- [20] Surendar A, Lucas A, Abbas M, Rahim R, Salmani M (2019) Transient liquid phase bonding of stainless steel 316 L to Ti-6Al-4 V using Cu/Ni multi-interlayer: microstructure, mechanical properties, and fractography. Weld word 63: 1025-1032.
- [21] Lison R, Stelzer J (1979) Diffusion Welding of Reactive and Refractory Metals to Stainless Steel. Weld J 59: 306- 314.
- [22] Grigor evskii VI (1986) Kinetics of formation of the joint in diffusion bonding titanium alloys. J Weld Prod 33: 36-37.
- [23] Orhan N, Khan TI, Eroglu M (2001) Diffusion bonding of a microduplex stainless steel to Ti-6Al-4V. Scripta Mater 45: 441–46.
- between Ti-6Al-4V and 304 Stainless Steel Using Nickel as an Intermediate Material. J Mater Sci 45: 2067- 2088.
- [4] Muthupandi V, Muralimuhan CH (2014) Properties of friction welding titanium-stainless steel joints with a nickel interlayer. Procedia Mater Sci 5: 1120 -1129.
- [5] Muralimuhan CH, Ashfaq M, Ashiri R, Muthupandi V, Sivaprasad K (2016) Analysis and characterization of the tole of Ni interlayer in the friction welding of titanium and 304 austenitic stainless steel. Metall Mater Trans A 47: 347–359.
- [6] Pardal G, Ganguly S, Williams S, Vaja J (2015) Dissimilar metal joining of stainless steel and titanium using copper as transition metal. Procedia Mater Sci 5: 1150 – 1159.
- [7] Kundu S (2011) Interface microstructure and strength properties of Ti64 and microduplex stainless steel diffusion bonded joints. Mater Des 32: 2997-3003.
- [۸] شجاعی زوارم ع (۱۳۹۱) جوشکاری غیرهمجنس آلیاژ حافظه دار نایتینول به Ti6Al4V با استفاده از لیزر ضرباتی Nd:YAG و بررسی خواص اتصال. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- [9] Shiue RK, Wu SK, Chan CH, Huang CS (2006) Infrared brazing of Ti-6Al-4V and 17-4PH stainless steel with a nickel barrier layer. Metall Mater Trans A 37: 2207–2217
- [10] Ghosh M, Chatterjee S (2005) Effect of interface microstructure on the bond strength of the diffusion welded joints between titanium and stainless steel. Mater Charact 54: 327– 337
- [11] He P, Zhang J, Zhou R, Li X (1999) Diffusion bonding technology of a titanium alloy to a stainless steel web with a Ni interlayer. Mater Charact 43: 287-292.
- [12] Kundu S, Mishra B, Olson DL, Chatterjee S (2013) Interfacial reactions and strength properties of diffusion bonded joints of Ti64 alloy and 17-4PH stainless steel using nickel alloy interlayer. Mater Des 51: 714–722.
- [13] Sam S, Kundu S, Chatterjee S (2012) Diffusion bonding of titanium alloy to micro-duplex stainless steel using a nickel alloy interlayer: Interface