



تأثیر پارامترهای جوشکاری نفوذی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس فولاد زنگ

نزن 17-4PH به آلیاژ Ti6Al4V با استفاده از لایه واسط نیکل

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۴

چکیده

جوشکاری نفوذی یک فرآیند جوشکاری حالت جامد می‌باشد که در آن سطوح تماس تحت فشار در دماهای بالا با حداقل تغییر شکل ماکروسکوپی به هم متصل شوند. هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری نفوذی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد 17-4PH و آلیاژ Ti6Al4V با استفاده از لایه واسط نیکل خالص با ضخامت ۱۵۰ میکرومتر می‌باشد. آزمایشها در کوره خلاء در سه دمای ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان ۴۵ و ۶۰ دقیقه و تحت فشار ۵ مگاپاسکال انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که در دماهای ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد، ترکیبات بین‌فلزی NiTi، NiTi₂ و NiTi₃ در مرز مشترک نیکل-تیتانیوم تشکیل می‌شوند در حالی که با افزایش دما به ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد، فازهای NiTi₂+Fe₂Ti، β-Ti و α-Ti+β-Ti در مرز اتصال تشکیل می‌شوند. کمترین میزان سختی (۵۶۲ ویکرز) در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه و بیشترین میزان سختی (۷۰۰ ویکرز) در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۶۰ دقیقه به دست می‌آید. با افزایش زمان جوشکاری نفوذی از ۴۵ به ۶۰ دقیقه در دو دمای ثابت ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد، استحکام برشی به ترتیب ۴/۸ درصد و ۲۳/۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای جوشکاری نفوذی از ۹۰۰ به ۹۵۰ درجه سانتیگراد در زمانهای ثابت ۴۵ و ۶۰ دقیقه، استحکام برشی به ترتیب ۵۵/۳ درصد و ۳۱/۷ درصد کاهش می‌یابد. بهترین استحکام برشی اتصال در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۶۰ دقیقه به میزان ۳۰۳ مگا پاسکال به دست آمد.

کلمات کلیدی: جوشکاری نفوذی، فولاد 17-4PH، آلیاژ Ti6Al4V، ریز ساختار، استحکام برشی

The effect of diffusion welding parameters on the microstructural characteristics and mechanical properties of dissimilar joint between 17-4PH steel and Ti6Al4V alloy using nickel interlayer

A. Azimi¹, A.Khorram^{2*}, Z. Valfi³, A. Yazdipour²¹ Master of science, Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar Univ. of Technology, Tehran, Iran² Assis. Prof., Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar Univ. of Technology, Tehran, Iran³ Assoc. Prof., Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar Univ. of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Diffusion welding is a solid-state welding process in which contacting surfaces to be joined under pressure at elevated temperatures with minimal macroscopic deformation. This study aimed to investigate the effect of diffusion welding parameters on the microstructural characteristics and mechanical properties of the dissimilar joint between 17-4PH steel and Ti6Al4V alloy using Ni interlayer with a thickness of 150 μm. The experiments were performed in a vacuum furnace at three temperatures of 900, 950 and 1050 °C for 45 and 60 min under the pressure of 5 MPa. The results indicate that at the temperatures of 900 and 950 °C, Ni₃Ti, NiTi and NiTi₂ intermetallic compounds are formed at the nickel-titanium interface, while with increasing the temperature to 1050 °C, NiTi₂+Fe₂Ti, β-Ti and β-Ti+α-Ti phases are formed at the interface. The minimum microhardness (562 HV) is achieved at the temperatures of 900 °C and time of 45 minutes and the maximum microhardness (700 HV) is obtained at the temperatures of 900 °C and time of 60 minutes. By increasing the time of diffusion welding from 45 to 60 minutes at two constant temperatures of 900 and 950 °C, the shear strength increases %4.8 and %23.6, respectively. Also, by increasing the temperature of diffusion welding from 900 to 950 °C at fixed times of 45 and 60 minutes, the shear strength decreases %55.3 and %31.7, respectively. The best shear bond strength was 303 MPa, which was obtained at the temperature of 900 °C and the time of 60 minutes.

Keywords: Diffusion Welding; 17-4PH Steel; Ti6Al4V alloy; Microstructure; Shear strength

۱- مقدمه

جوشکاری نفوذی یک روش اتصال مناسب برای کاربردهای هوافضا، الکترونیک و هسته‌ای است که در آن به دست آوردن یک پیوند متالورژیکی سالم و خواص مکانیکی مناسب در ناحیه اتصال حائز اهمیت است [۱]. جوشکاری نفوذی یک فرآیند جوشکاری حالت جامد است که در آن سطوح تماس تحت فشار در دماهای بالا (بین ۰/۷ تا ۰/۹ دمای ذوب مواد) با حداقل تغییر شکل ماکروسکوپی به هم متصل شوند. این فرآیند جوشکاری دارای مزایایی نسبت به روش‌های جوشکاری معمولی است؛ از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود: (۱) تنش‌های پسماند در روش جوشکاری نفوذی بسیار کمتر از روش‌های دیگر جوشکاری است. (۲) می‌توان با استفاده از روش جوشکاری نفوذی، از تشکیل ترک، اعوجاج و جدایش که معمولاً در روش‌های جوشکاری ذوبی ایجاد می‌شود اجتناب نمود [۲].

یکی از کاربردهای ویژه اتصال آلیاژ Ti6Al4V به فولاد 17-4PH در موتورهای توربینی برای اتصال قطعات دوار می‌باشد. مشکل متالورژیکی اصلی در اتصال تیتانیوم به فولاد، تشکیل ترکیبات ترد بین‌فلزی شامل TiFe و TiFe₂ می‌باشد. 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 [۳].

برای جوشکاری غیرهمجنس 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 خواص مابین دو فلز پایه می‌تواند از بوجود آمدن عیوب انقباضی در حین سرد شدن منطقه اتصال جلوگیری نماید. در مقایسه با اتصالات انجام شده با فلزات واسطه دیگر، نیکل به دلیل مقاومت در برابر خوردگی مناسب در دماهای بالا، می‌تواند به عنوان یک لایه واسطه مناسب در نظر گرفته شود. در مواردی که از نیکل بعنوان لایه واسطه

استفاده می‌شود وضعیت سطح اتصال از نظر تشکیل فازهای ترد بین‌فلزی در سمت اتصال با فولاد شرایط مناسبی دارد ولی در سمت تیتانیوم تشکیل فازهای ترد بین‌فلزی اجتناب ناپذیر است [۴-۷].

طی تحقیقات انجام شده توسط کاندو و همکاران [۸] مشخص گردید اتصال تیتانیوم خالص تجاری به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ توسط 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 [۹] از لایه واسطه 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 [۱۰] انجام شد، اتصال بین Ti6Al4V و 17-4PH توسط روش لحیم کاری سخت مادون قرمز و با استفاده از فلز پرکننده I3Ag-8 مورد بررسی قرار گرفت. لایه واسطه نیکل و کروم به ضخامت ۱۰ میکرومتر روی فولاد 17-4PH قبل از عملیات پوشش داده شد. نتایج حاکی از آن است که هنگام استفاده از فیلر I3Ag-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 مگاپاسکال در دمای ۸۵۰ درجه به مدت ۳ دقیقه حاصل شد. نمونه فولادی پوشش داده شده با کروم نیز با فیلهای 75Ti-1، 25Cu-1 و 63Ag-35 تحت عملیات لحیم کاری سخت مادون قرمز قرار گرفت. ریزساختار سمت فولاد رسوب سخت شونده^۱ شامل زمینه غنی از نقره و فازهای بین‌فلزی TiCu و Cr₂Ti بود. قوش و همکاران [۱۱] 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 ، α ، FeTi، β -Ti و Fe₂Ti₄O در منطقه نفوذ وجود دارد. حداکثر استحکام اتصال ۷۱ درصد استحکام تیتانیوم به دست آمد. هی و همکاران [۱۲]، جوشکاری نفوذی Ti6Al4V و فولاد زنگ نزن را با استفاده از لایه واسطه نیکل آلیاژی به ضخامت ۳۰ میکرومتر

^۱ Precipitation Hardening Steel

فلز پایه و عناصر تیتانیوم، آهن، کروم، آلومینیوم، نیکل، منگنز، سیلیسیوم و کربن از فلزات پایه به داخل لایه واسط برنج مشاهده می‌شود. کومار و همکاران [۱۷] 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. ثابت قدم و همکاران [۱۸] از روش جوشکاری نفوذی برای اتصال صفحات فولاد زنگ نزن ۴۱۰ و مس با استفاده از لایه واسط نیکل خالص در محدوده دمایی ۸۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد استفاده نمودند. نتایج نشان می‌دهد که یک منطقه نفوذ نزدیک سطح مشترک مس/نیکل و نیکل/فولاد در طول جوشکاری نفوذی تشکیل می‌شود. فازهای αNi , Cu, γFe , Ni, σ , Fe, Ni, Cr, γFe , αFe , FeNi_3 , Ni و CuO در سطح مشترک نفوذ تشکیل می‌شوند. رانجان کومارو و همکارانش [۱۹] از روش جوشکاری نفوذی برای اتصال بین فولاد زنگ نزن آستنیتی^۲ (فولاد ۳۲۱) و آلیاژ تیتانیوم-Ti (5Al-2.5Sn ELI) 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 ، $\beta\text{-Ti}$ و $\lambda + \text{Fe}_2\text{Ti} + \text{FeTi}$ است. عرض این لایه‌ها با افزایش دما و زمان افزایش می‌یابد. حداکثر استحکام برشی ۳۴۸ مگا پاسکال در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد به دست می‌آید. آتاسوی و همکارانش [۲۰] 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 بر 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 [۲۱] مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایشات در محدوده دمایی ۸۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد به مدت زمان ۱/۵ ساعت تحت فشار ۳ مگا پاسکال در حلال انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد

در محدوده دمایی ۸۵۰ تا ۸۸۰ درجه سانتیگراد در زمان‌های ۱۰ تا ۲۰ دقیقه تحت بار ۱۰ تا ۱۵ مگا پاسکال بررسی نمودند. نتایج حاکی از آن است که حداکثر استحکام برشی ۱۴۸ مگا پاسکال به دست می‌آید. کاندو و همکارانش [۱۳] 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 مگا پاسکال و در فشار حلال 2×10^{-4} پاسکال 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 آنها 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 [۱۴] اتصال نفوذی Ti6Al4V و فولاد زنگ نزن میکرو دابلکس^۱ 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 مگا پاسکال 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 مگا پاسکال در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه به دست آمد. کاندو و همکاران [۱۵] ریز ساختار و خواص استحکامی اتصال نفوذی Ti6Al4V و فولاد زنگ نزن میکرو دابلکس را بدون استفاده از لایه واسط و با استفاده از لایه واسط نیکل آلیاژی بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد حداکثر استحکام برشی ۴۰۵ مگا پاسکال برای اتصال مستقیم به دست می‌آید، در حالیکه در صورت استفاده از لایه واسط نیکل آلیاژی، حداکثر استحکام برشی به ۴۷۹ مگا پاسکال افزایش خواهد یافت. ویگرامان [۱۶] از لایه واسط برنج برای اتصال آلیاژ Ti6Al4V و فولاد ۳۰۴L 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

^۲ Austenitic Stainless Steel^۱ Microduplex Stainless Steel

ضخامت ۱۵۰ میکرومتر از طریق عملیات نورد تهیه شد. ضخامت فویل براساس تحقیقات انجام شده توسط کاندو و همکاران [۱۳] انتخاب گردید.

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	

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti6Al4V

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

۲-۲- آماده سازی اتصال و انجام تست

بعد از انجام برشکاری و آماده سازی نمونه های اولیه، فیلم های اکسیدی موجود بر روی سطوحی از نمونه ها که در معرض اتصال قرار می گیرند با استفاده از سمباده ۴۰۰ حذف شدند. سپس سطوح نمونه ها با سمباده های ۸۰ تا ۲۴۰۰ به صورت مکانیکی پولیش شدند. از پودر Al_2O_3 و خمیر الماس برای پرداختکاری استفاده شد. بعد از عملیات سمباده زنی و پرداختکاری سطوح اتصال، نمونه ها در داخل استون^۲ به مدت زمان ۱۵ دقیقه تحت عملیات شستشو قرار گرفتند تا از حذف تمام آلودگی های سطحی اطمینان حاصل شود.

پس از انجام عملیات آماده سازی، نمونه ها 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 نگه دارنده، پیچ ها، ابزار انتقال نیرو و قطعات نمونه می باشد. همان طور که مشاهده می شود، آلیاژ Ti6Al4V بر روی صفحه نگهدارنده پایینی قرار داده شد و فولاد 17-4PH بر روی این آلیاژ قرار گرفت. به منظور اعمال فشار یکسان در سطوح نمونه ها و اعمال نیروی بیشتر از سیستمی شامل چهار پیچ استفاده شد. پیچ های ابزار توسط گشتاور سنج سفت شدند تا بتوان میزان گشتاور اعمالی توسط پیچ ها را کنترل نمود تا به میزان برابر اعمال شود. جنس فلز مورد استفاده برای ساخت این ابزار، فولاد نسوز^۳ ۴۸۴۱ انتخاب

که لایه های واکنش متفاوتی در ناحیه نفوذ تشکیل می شود و حداکثر استحکام ۳۱۸ مگاپاسکال در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد به دست می آید. سورندار و همکارانش [۲۲] از روش فاز مایع گذرا^۱ برای اتصال فولاد زنگ نزن ۳۱۶ به آلیاژ Ti6Al4V با استفاده از لایه های 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 می دهد که فازهای یوتکتیک و ترکیبات بین فلزی مختلفی در سطح مشترک تشکیل می شوند. هر چه دمای اتصال به بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد افزایش یابد، خواص مکانیکی اتصال بدتر می شود به نحوی که استحکام برشی اتصال از ۳۸۵ مگاپاسکال به ۲۵۷ مگاپاسکال کاهش می یابد.

در این مقاله آلیاژ Ti6Al4V به فولاد 17-4 PH با استفاده از روش جوشکاری نفوذی و لایه واسط نیکل خالص به یکدیگر متصل شدند. هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر تغییرات دما و زمان بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال است. برای این منظور آزمایش ها در دماهای ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد و زمان های ۴۵ و ۶۰ دقیقه انجام شد. 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 می تواند به تشکیل فازهای ترد پیچیده تر 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

۲-۱- فلزات پایه و لایه واسط نیکل

مواد اولیه شامل یک میلگرد فولاد 17-4PH به قطر ۱۰ میلیمتر و یک میلگرد Ti6Al4V به قطر ۲۰ میلیمتر بود که از هر یک تعدادی نمونه به طول یک سانتی متر 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

³ Heat resistant Steel

¹ Transient Liquid Phase Bonding

² Aceton

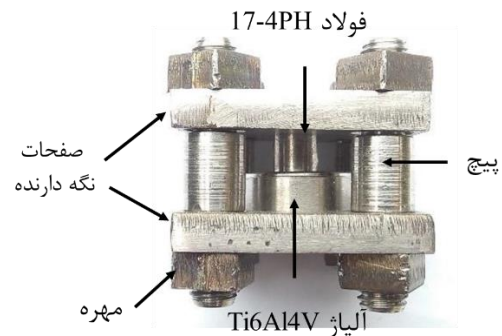


شکل ۲- تصویر نمونه جوشکاری شده: الف) قبل از وایرکات ب) بعد از وایرکات

۲-۳- مشخصات ریزساختاری

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 دوماده 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 و آنالیز فازها و مناطق مختلف سطوح اتصال از میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل Tescan Mira3) مجهز شده به دستگاه سنجش شدت انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد.

شد. به منظور ثابت نگهداشتن نمونه‌ها، در مرکز هر صفحه پله ای به عمق دو میلیمتر ایجاد شد.



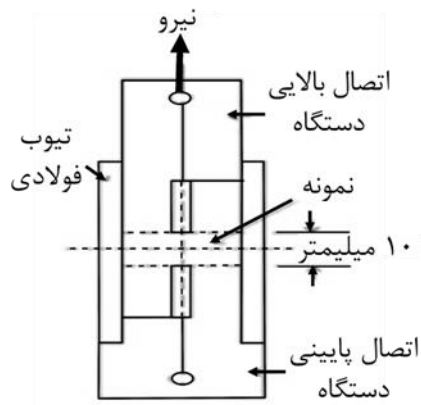
شکل ۱- طرح سیستم اعمال نیرو در فرآیند جوشکاری نفوذی

کل مجموعه داخل کوره مافلی^۱ با حداکثر دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. جوشکاری نفوذی در سه دمای ۹۵۰، ۹۰۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد و زمان‌های ۴۵ و ۶۰ دقیقه با فشار ۵ مگا پاسکال با استفاده از لایه واسط نیکل خالص انجام پذیرفت. سطوح پارامترهای جوشکاری نفوذی براساس تحقیقات انجام شده توسط سایر محققین [۱۲-۱۵] و تست‌های اولیه انتخاب شدند. هوای داخل کوره توسط پمپ های روتاری و نفوذی تخلیه گردید تا به فشار ۱۰^{-۵} 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. در شکل ۲ تصویر یکی از نمونه جوشکاری شده، قبل و بعد از وایرکات نشان داده شده است.

^۱ Muffle

۲-۴- ارزیابی خواص مکانیکی

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 نمونه های متصل شده در دمای اتاق طبق استاندارد ASTM D2295-96 ارزیابی شدند. برای این منظور هر یک از نمونه های تست برش بصورت استوانه هایی به قطر ۸ میلیمتر و ارتفاع ۱۰ میلیمتر تهیه شدند [۸]. نمونه های جوشکاری شده با لایه واسط نیکل در نگهدارنده نشان داده شده در شکل ۳ قرار داده شدند و به فک های دستگاه تست کشش بسته شدند تا نیروی قائم و کششی توسط فک بصورت برشی و موازی با فصل مشترک به نمونه ها اعمال شود.



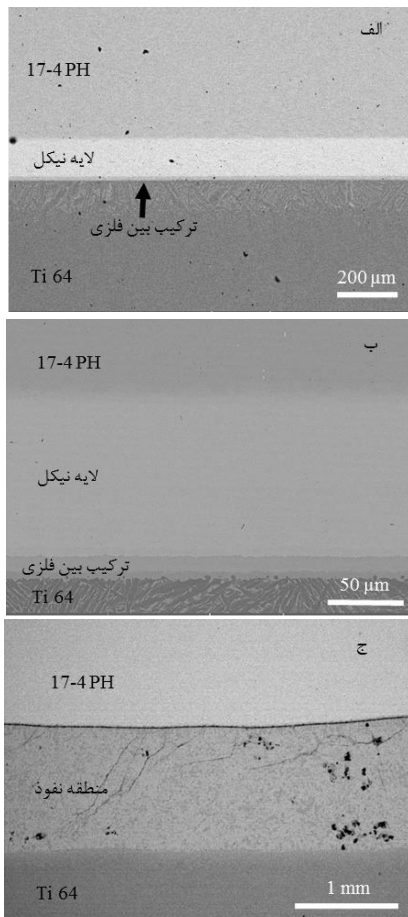
شکل ۳- شماتیکی از نگهدارنده آزمون استحکام برشی استفاده شده [۸].

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تاثیر تغییرات دما بر ریز ساختار اتصال در زمان ۴۵ دقیقه

در شکل ۴ منطقه اتصال بین Ti6Al4V، نیکل خالص و فولاد 17-4PH در زمان ۴۵ دقیقه و در دماهای ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۴ الف و ب مشاهده می شود، در فصل مشترک فولاد و لایه واسط نیکل، منطقه نفوذ عاری از ترکیبات بین فلزی است؛

بنابراین هیچ انفصالی بین طرفین وجود ندارد و اتصال به صورت سرتاسری انجام شده است. در شکل ۴ ج که دما به ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد افزایش یافته است، آلیاژ نیکل نمی تواند از مهاجرت اتم های تیتانیوم به سمت فولاد زنگ نزن و بالعکس و همچنین تشکیل ترکیبات بین فلزی بر پایه Fe-Cr-Ti و Fe-Ti ممانعت کند؛ بنابراین مقداری انفصال و جدایش به صورت بریده بریده در قسمت هایی از فصل مشترک مشاهده می شود. در شکل ۴ ج، تعدادی حفره به رنگ تیره مشاهده می شود. این حفرات به حفره های کرکندال^۱ موسومند که ناشی از تفاوت در سرعت نفوذ عناصر در طرفین اتصال هستند [۲۳ و ۲۴].



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از منطقه اتصال بین Ti6Al4V، نیکل خالص و فولاد 17-4PH در زمان ۴۵ دقیقه: الف) دما ۹۰۰ درجه سانتیگراد ب) دما ۹۵۰ درجه سانتیگراد ج) دما ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد.

^۱ kirkendall

سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه نمی‌تواند شرایط مناسبی را برای اتصال طرفین فراهم نماید.

در شکل‌های ۵ تا ۷ آنالیز نقاط در امتداد خط عمود بر فصل مشترک اتصال نمایش داده شده است. با کمک این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت با بالا رفتن دما در زمان ثابت، تعداد بیشتری از اتم‌ها به سطح مشترک مهاجرت می‌کنند. این امر منجر به افزایش عرض لایه‌های واکنش و میزان عمق نفوذ می‌گردد. هرچه میزان عمق نفوذ افزایش یابد، آمیختگی طرفین اتصال در یکدیگر بیشتر شده و پیوندهای متالورژیکی مستحکم‌تری شکل می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه، میانگین عمق نفوذ در فصل مشترک فولاد PH 17-4 و نیکل حدود ۲۰ میکرومتر و در فصل مشترک Ti6Al4V و نیکل در حدود ۲۵ میکرومتر است. این در حالی است که در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه، میانگین عمق نفوذ در فصل مشترک فولاد PH 17-4 و نیکل حدود ۲۴ میکرومتر و در فصل مشترک Ti6Al4V و نیکل حدود ۳۰ میکرومتر است (شکل ۶) که نشان از افزایش عمق نفوذ عناصر و نیز افزایش استحکام پیوندهای ایجاد شده با افزایش دما دارد. ضخامت لایه واکنشی در سمت آلیاژ Ti6Al4V بزرگتر از طرف فولاد است. در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد، فولاد ساختار FCC خود را حفظ می‌کند، اما تیتانیوم یک تبدیل فاز از HCP به BCC را در دمای ۸۸۲ درجه سانتیگراد متحمل می‌شود. فاز BCC در مقایسه با فاز FCC کریستالوگرافی بازتری دارد؛ بنابراین نفوذ نیکل به داخل آلیاژ تیتانیوم راحت‌تر است [۱۱].

افزایش دما تا حدی می‌تواند مطلوب باشد و از جایی به بعد به عاملی برای تشکیل عیوب تبدیل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه، شرایط برای نفوذ به قدری مناسب بوده که عناصر تیتانیوم، آلومینیوم و وانادیوم موجود در فلز پایه Ti6Al4V تمام عرض لایه واسط را طی کرده و خود را به سمت فولاد PH 17-4 رسانده‌اند. به عبارت دیگر در این شرایط، ترکیبات بین‌فلزی مضر برپایه Fe-Ti و Fe-Cr-Ti به راحتی می‌توانند تشکیل شوند. تشکیل این فازهای ترد، بهترین بستر برای تشکیل و رشد ترک است. به دلیل افزایش بیش از حد نفوذ در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد، پهنای منطقه اتصال حدود ۱/۲۵ میلی‌متر رسیده است؛ یعنی پهنای منطقه اتصال

عرض لایه ترکیبات بین‌فلزی با تغییر در دما و زمان فرآیند تغییر خواهد کرد. با فرض سهموی بودن رشد لایه ترکیبات بین‌فلزی (از آنجایی که نفوذ کنترل شده در نظر گرفته می‌شود)، رشد لایه را می‌توان با معادله زیر بیان نمود [۱۴]:

$$\begin{aligned} X^2 &= Dt, \\ D &= D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

در اینجا X ضخامت لایه واکنش (m)، t زمان اتصال (s)، D مقدار ضریب نفوذ در دمای مورد نظر ($m^2 \cdot s^{-1}$)، D_0 ثابت نفوذ ($m^2 \cdot s^{-1}$)، Q انرژی اکتیواسیون لازم برای نفوذ ($KJ \cdot mol^{-1}$)، T دمای مورد نظر (K) و R ثابت گازها ($J/Kmol$) می‌باشد.

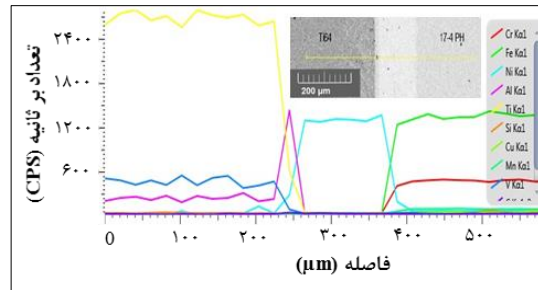
در فرآیند جوشکاری نفوذی، با افزایش هر دو پارامتر زمان و دما، نفوذ افزایش می‌یابد اما میزان تاثیر این دو پارامتر متفاوت است. اکثر واکنش‌هایی که با نفوذ کنترل می‌شوند، تابع زمان هستند. با توجه رابطه بالا مشخص است که نفوذ به صورت نمایی با دما تغییر می‌کند و تغییرات اندک دما باعث ایجاد تغییرات عمده‌ای در سینتیک فرآیند می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که واکنش‌های نفوذ با ریشه دوم زمان مرتبط می‌باشند؛ یعنی در زمان‌های طولانی‌تر، فعالیت کمتر می‌گردد [۱۵].

ضرایب نفوذ عناصر تیتانیوم و آهن در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد به ترتیب عبارتند از: $5.5 \times 10^{-14} m^2 \cdot s^{-1}$ و $3 \times 10^{-17} m^2 \cdot s^{-1}$ [۱۹]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب نفوذ تیتانیوم از آهن بیشتر است. وجود این تفاوت در ضرایب انتشار ذاتی سبب ایجاد عدم توازن در جریان شار اتم‌ها در سطح مشترک می‌شود. این امر امکان تشکیل حفره‌های کرکندال را میسر می‌سازد [۲۳ و ۲۴]؛ همچنین تعدادی ترک به مرکزیت این حفره‌ها مشاهده می‌شوند. از آنجا که این حفره‌ها در ابتدای ترک‌ها هستند، می‌توان نتیجه گرفت، علاوه بر تشکیل فازهای ترد، این حفره‌ها می‌توانند نقش عمده‌ای در کاهش استحکام اتصال داشته باشند. حفره‌های ایجاد شده مناطق بسیار مستعدی برای جوانه‌زنی ترک‌ها هستند. از آنجایی که ترک‌های پدید آمده در مناطق ترد واقع شده‌اند، به راحتی امکان رشد و پیش روی آن‌ها فراهم شده است. با توجه به اینکه در هیچ یک از استانداردهای جوشکاری، حتی کوچک‌ترین ترکی قابل قبول نمی‌باشد؛ بنابراین دمای ۱۰۵۰ درجه

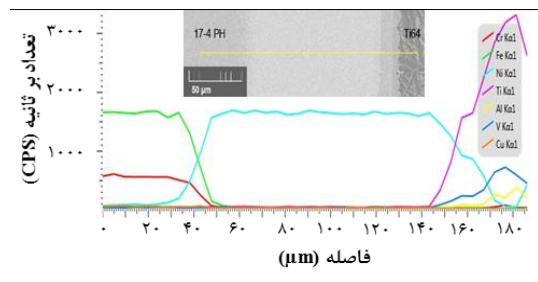
در شکل ۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نواحی آنالیز عنصری از فازهای تشکیل شده در منطقه اتصال در دماهای ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه نشان داده شده است. آنالیز نواحی I، II و III نشان داده شده در شکل‌های ۸ الف و ب به ترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. از دیگرام فازی دوتایی Ni-Ti پیش بینی می‌شود که این نواحی شامل فازهای Ni_3Ti ، $NiTi$ و $NiTi_2$ است (شکل ۹). فلزاتی که نقطه ذوب کمتری دارند، ضریب نفوذ بیشتری خواهند داشت و بالعکس [۱۸]. بر این اساس فلزی که نقطه ذوب کمتری (نیکل) دارد، به داخل فلزی که نقطه ذوب بالاتری دارد (تیتانیوم) نفوذ می‌کند. نقطه ذوب تیتانیوم ۱۶۶۸ درجه سانتیگراد و نقطه ذوب نیکل ۱۴۵۵ درجه سانتیگراد است.

تشکیل محلول جامد هنگامی میسر است که اختلاف شعاع اتمی دو عنصر کمتر از ۱۵٪ باشد و اگر اختلاف شعاع اتمی بیش از ۱۵٪ باشد، تشکیل محلول جامد بسیار محدود است و احتمال تشکیل ترکیبات بین فلزی و در نتیجه کاهش استحکام اتصال افزایش خواهد یافت [۲۵]. شعاع اتمی تیتانیوم ۱۴۷ pm و شعاع اتمی نیکل ۱۲۴ pm است. (اختلاف شعاع اتمی ۱۶ درصد). با توجه به شرایط تشکیل محلول جامد و با توجه به اختلاف شعاع اتمی نیکل و تیتانیوم احتمال تشکیل محلول جامد نیکل در تیتانیوم بسیار ناچیز بوده و بیشتر به صورت ترکیبات بین فلزی تشکیل می‌شوند. همچنین بر طبق تحقیقات انجام شده توسط کاندو و همکارانش [۸] 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 اتصالی بهتر با خواص بالاتر را مقدور سازد. این ترکیبات بین فلزی شامل سه لایه مجزا بوده که طبق مطالب بیان شده لایه I شامل ترکیبات بین فلزی Ni_3Ti ، لایه II شامل ترکیبات بین فلزی $NiTi$ و لایه III شامل ترکیبات بین فلزی $NiTi_2$ هستند.

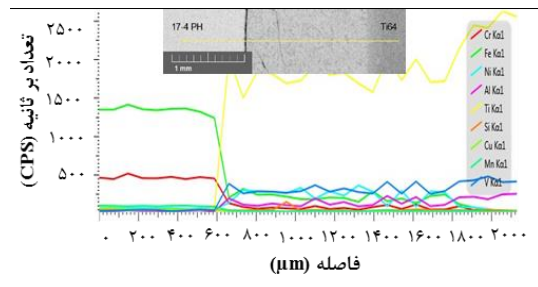
تقریباً ۹ برابر ضخامت لایه واسط افزایش یافته است و این موضوع به معنی ۹ برابر شدن حجم ترکیبات ترد و نامطلوب در مقایسه با حالات قبلی است.



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با آنالیز خطی عناصر در منطقه اتصال بین Ti6Al4V، نیکل خالص و فولاد 17-4PH در زمان ۴۵ دقیقه و دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد.



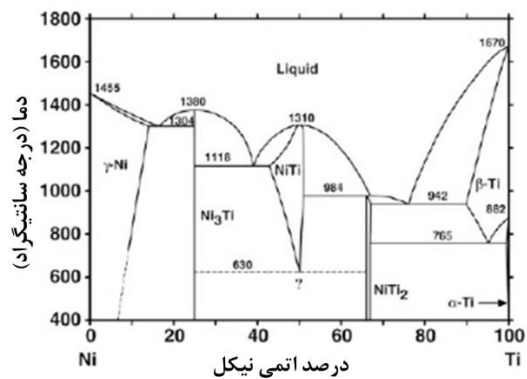
شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با آنالیز خطی عناصر در منطقه اتصال بین Ti6Al4V، نیکل خالص و فولاد 17-4PH در زمان ۴۵ دقیقه و دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد.



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با آنالیز خطی عناصر در منطقه اتصال بین Ti6Al4V، نیکل خالص و فولاد 17-4PH در زمان ۴۵ دقیقه و دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد.

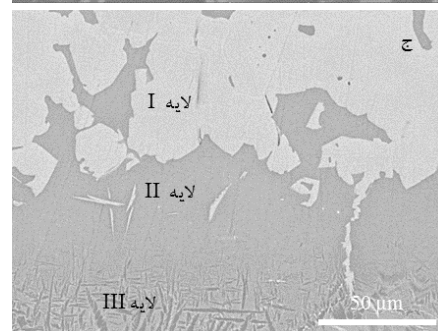
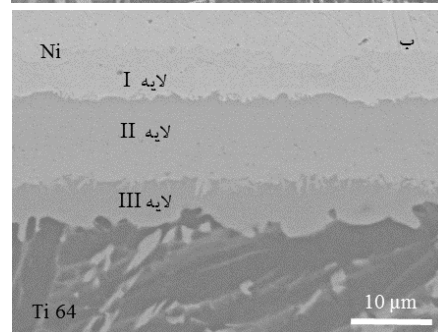
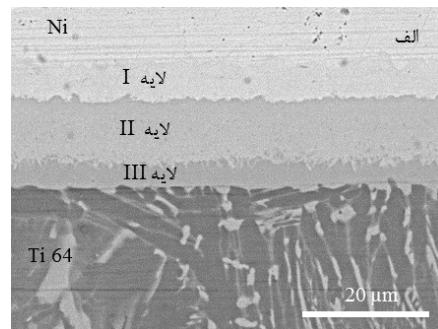
جدول ۴- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل ۸ (ب) بر

حسب درصد وزنی					
V	Al	Ni	Fe	Ti	
۰/۲	۰/۹	۲۴/۱	-	۷۴/۸	I لایه
-	۱/۳	۵۱/۳	۰/۵	۴۶/۹	II لایه
۰/۸	۲/۳	۳۴/۳	-	۶۲/۶	III لایه



شکل ۹- دیاگرام فازی دوتایی نیکل - تیتانیوم [۲۶]

با افزایش دما به ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد و رسیدن عناصر تیتانیوم به کروم و آهن، ترکیب لایه نفوذی تغییر می‌کند و دیگر لایه‌های $NiTi_2$ ، Ni_3Ti و $NiTi$ در فصل مشترک $Ti6Al4V$ و نیکل تشکیل نمی‌شوند. باید توجه داشت، دمای استحاله α به β در آلیاژ $Ti6Al4V$ حدود ۹۸۰ درجه سانتیگراد است و در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد، این استحاله در فلز پایه $Ti6Al4V$ رخ خواهد داد. با سرد شدن قطعه درون کوره، این استحاله بصورت برعکس اتفاق خواهد افتاد، اما به دلیل کاملاً تعادلی نبودن شرایط سرد شدن، مقداری از فازهای تشکیل شده باقی خواهد ماند؛ همچنین به دلیل بالا بودن دما، رشد بیش از حد دانه‌های فلزات پایه و کاهش خواص مکانیکی قابل انتظار خواهد بود. در شکل ۸ ج، این فازهای جدید با علامت‌های I، II و III نمایش داده شده‌اند. آنالیز این فازها در جدول ۵ ارائه شده است. از دیاگرام فازی سه تایی Fe-Ni-Ti پیش بینی می‌شود که این نواحی شامل فازهای $NiTi_2+Fe_2Ti$ ، $\beta-Ti$ و $\alpha-Ti+\beta-Ti$ می‌باشد (شکل ۱۰)؛ همچنین با مقایسه نسبت درصد عناصر موجود در ناحیه I با سایر تحقیقات انجام گرفته [۴۳] مشخص می‌شود، این ناحیه با ترکیب دو فاز $NiTi_2+Fe_2Ti$ مطابقت دارد. آنالیز ناحیه II با فاز $\beta-Ti$ مطابقت

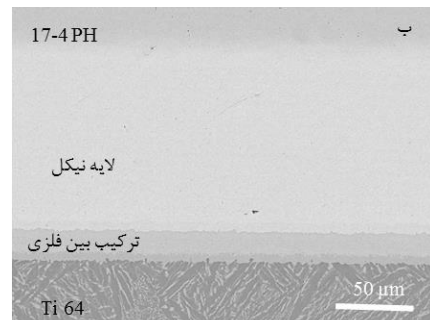
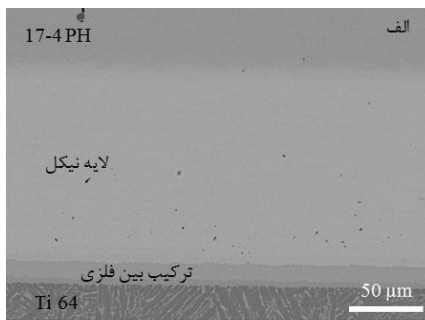


شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نواحی آنالیز عنصری از فازهای تشکیل شده در منطقه اتصال در زمان ۴۵ دقیقه: الف) دما ۹۰۰ درجه سانتیگراد (ب) دما ۹۵۰ درجه سانتیگراد (ج) دما ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد.

جدول ۳- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل ۸ (الف) بر

حسب درصد وزنی					
V	Al	Ni	Fe	Ti	
۰/۳	۱/۸	۲۲/۴	-	۷۵/۵	I لایه
-	۱/۶	۵۴/۵	۰/۳	۴۳/۷	II لایه
۰/۷	۲/۱	۳۲/۳	-	۶۴/۹	III لایه

درجه سانتیگراد نمایش داده شده است. به دلیل نفوذ بیش از حد در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه و ایجاد حفرات همراه با ترک، از تکرار این دما در زمان ۶۰ دقیقه خودداری شده است. همان طور که مشاهده می شود، به علت کافی بودن زمان خزش در هر دو دما، اتصال با موفقیت انجام شده است و هیچ حفره و جدایشی مشاهده نمی شود و نفوذ به صورت سرتاسری در مرز اتصال رخ داده است. با مقایسه شکل های ۱۱ الف و ب با شکل های ۴ الف و ب مشاهده می شود با افزایش دما و زمان، امتزاج بین فصل مشترک Ti6Al4V و نیکل بیشتر شده است، به گونه ای که اشکالی شبیه به تلاطم امواج بیشتر می شود و پیوندهای بهتری در این نواحی شکل می گیرد. این اشکال شبیه به تلاطم امواج نشان دهنده میزان نفوذ متفاوت از مسیرهای مرجح مانند مرزهای دانه و ... می باشند.



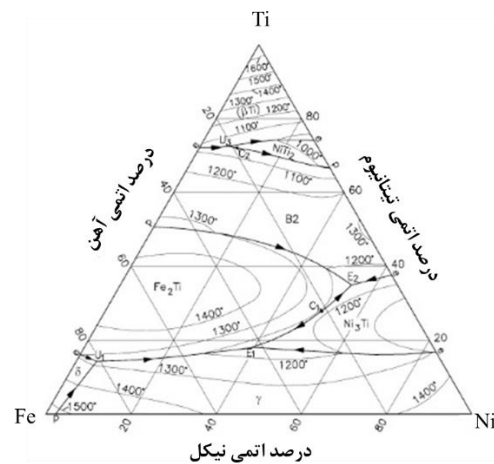
شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از منطقه اتصال بین Ti6Al4V، نیکل خالص و فولاد 17-4PH در زمان ۶۰ دقیقه: الف) دما ۹۰۰ درجه سانتیگراد ب) دما ۹۵۰ درجه سانتیگراد.

در شکل های ۱۲ و ۱۳ آنالیز نقاط در امتداد خط عمود بر فصل مشترک اتصال نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، میانگین عمق نفوذ در فصل مشترک

دارد. آنالیز ناحیه III، مانند شرایط دماهای پایین همان فاز β - α -Ti+Ti است.

جدول ۵- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل ۸ (ج) بر حسب درصد وزنی

Cr	V	Al	Ni	Fe	Ti	
۳/۱	۱/۳	۲/۲	۲۲/۱۵	۱۸/۰۵	۵۳/۲	لایه I
۵/۱	۳/۷۵	۱	۵/۹۵	۱۱/۳	۷۲/۹	لایه II
-	۲/۷	۷/۸	۱/۸	-	۸۷/۷	لایه III



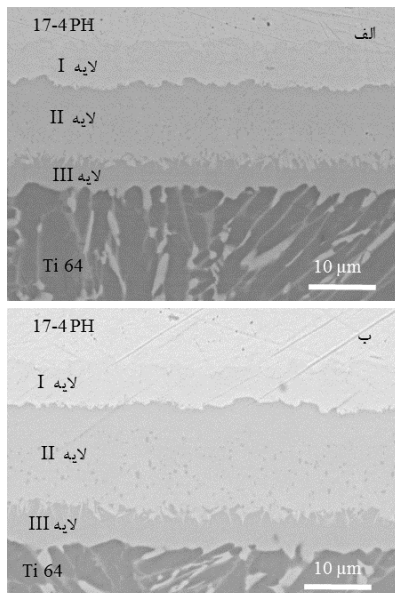
شکل ۱۰- دیاگرام فازی سه تایی آهن- نیکل- تیتانیوم [۲۶].

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود با افزایش دما از ۹۰۰ به ۹۵۰ درجه سانتیگراد مجموع ضخامت سه لایه تشکیل شده از ۲۵ به ۳۰ میکرومتر افزایش می یابد. این افزایش ضخامت یک عامل کاهش دهنده خواص مکانیکی است؛ بنابراین هر چند افزایش دما از ۹۰۰ به ۹۵۰ درجه سانتیگراد منجر به افزایش میزان نفوذ و بهبود استحکام پیوند می شود، اما افزایش ضخامت لایه های ترکیبات بین فلزی می تواند تأثیری منفی در استحکام اتصال داشته باشد. در نتیجه میزان دما باید در یک حد بهینه انتخاب، تا بهترین شرایط اتصال فراهم شود.

۲-۳- تاثیر تغییرات دما بر ریزساختار اتصال در زمان ۶۰ دقیقه

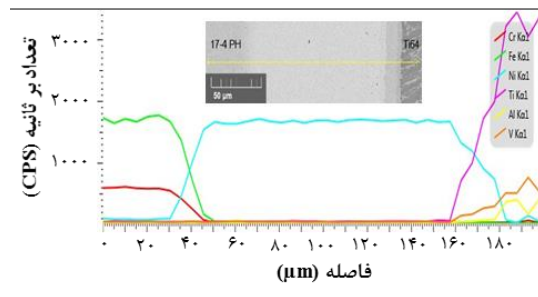
در شکل ۱۱ منطقه اتصال بین Ti6Al4V، نیکل خالص و فولاد 17-4PH در زمان ۶۰ دقیقه و در دماهای ۹۰۰ و ۹۵۰

شکل‌های ۱۴ الف و ب به ترتیب جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، ترکیبات بین‌فلزی شامل سه لایه مجزا بوده که طبق مطالب بیان شده لایه I شامل ترکیبات بین‌فلزی NiTi، لایه II شامل ترکیبات بین‌فلزی NiTi و لایه III شامل ترکیبات بین‌فلزی NiTi₂ هستند. دیاگرام فازی دو تایی Ni-Ti نیز موید تشکیل فازهای فوق می‌باشد. در شکل ۱۴ الف مجموع ضخامت لایه‌های تشکیل شده ۲۲ میکرومتر و در شکل ۱۴ ب مجموع ضخامت این لایه‌ها برابر با ۲۶ میکرومتر است؛ بنابراین مشاهده می‌شود، با افزایش دما، عرض لایه ترکیبات بین‌فلزی تشکیل شده افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه مقادیر بدست آمده با مقادیر نمونه‌های متصل شده در زمان ۴۵ دقیقه مشخص می‌شود، در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد با افزایش زمان از ۴۵ به ۶۰ دقیقه، مجموع ضخامت لایه‌های تشکیل شده از ۲۰ به ۲۲ میکرومتر و در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد از ۲۴ به ۲۶ میکرومتر افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند، با افزایش هر دو پارامتر دما و زمان، ضخامت لایه‌های تشکیل شده افزایش ضخامت می‌یابد که تاثیر منفی بر خواص مکانیکی اتصال دارد. همچنین مشخص می‌شود، تاثیر دما در رشد این لایه‌ها بیشتر از افزایش زمان است.

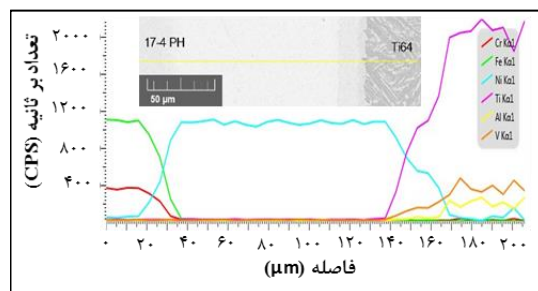


شکل ۱۴ - تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نواحی آنالیز عنصری از فازهای تشکیل شده در منطقه اتصال در زمان ۶۰ دقیقه: الف) دما ۹۰۰ درجه سانتیگراد (ب) دما ۹۵۰ درجه سانتیگراد.

Ti6Al4V و نیکل در دمای ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد به ترتیب ۳۰ و ۳۵ میکرومتر است؛ همچنین میانگین عمق نفوذ در فصل مشترک فولاد 17-4 PH و نیکل در دمای ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد به ترتیب ۲۵ و ۲۶ میکرومتر است. مشخص است، با افزایش دما از ۹۰۰ به ۹۵۰ درجه سانتیگراد، عمق نفوذ در هر دو فصل مشترک افزایش یافته است، اما این افزایش در فصل مشترک Ti6Al4V و نیکل بیشتر قابل مشاهده است؛ همچنین با مقایسه عمق نفوذ بدست آمده در زمان ۶۰ دقیقه نسبت به زمان ۴۵ دقیقه مشخص می‌شود که در هر دو فصل مشترک Ti6Al4V و نیکل و نیز فولاد 17-4 PH و نیکل، عمق نفوذ چیزی در حدود ۵ میکرومتر افزایش یافته است.



شکل ۱۲ - تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با آنالیز خطی عناصر در منطقه اتصال بین Ti6Al4V، نیکل خالص و فولاد 17-4PH در زمان ۶۰ دقیقه و دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد.

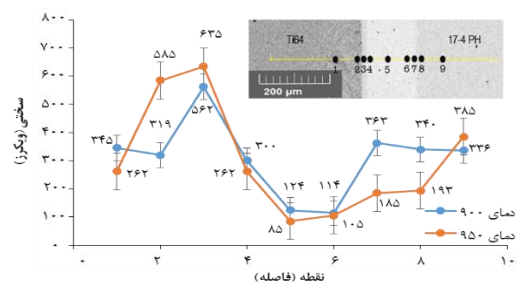


شکل ۱۳ - تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با آنالیز خطی عناصر در منطقه اتصال بین Ti6Al4V، نیکل خالص و فولاد 17-4PH در زمان ۶۰ دقیقه و دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد.

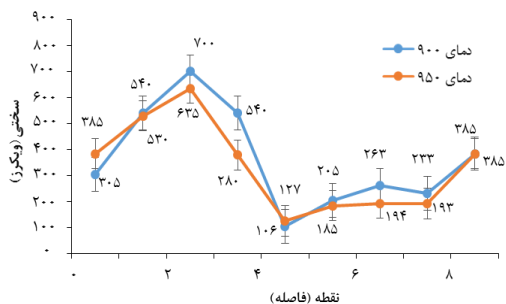
در شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نواحی آنالیز عنصری از فازهای تشکیل شده در منطقه اتصال در دماهای ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ۶۰ دقیقه نشان داده شده است. آنالیز نواحی I، II و III نشان داده شده در

مکانیکی می‌تواند به عنوان منطقه تمرکز تنش عمل نماید و با جوانه‌زنی و رشد ترک از همین ناحیه اتصال جدا شود.

با مقایسه مقادیر سختی در شکل‌های ۱۵ الف و ب مشخص می‌شود، نمونه‌ای که در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه متصل شده است، دارای کمترین میزان سختی است (۵۶۲ ویکرز)؛ بنابراین از لحاظ ترکیبات بین‌فلزی تشکیل شده دارای شرایط بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد. بیشترین سختی ثبت شده (۷۰۰ ویکرز) در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۶۰ دقیقه است که مربوط به ترکیبات بین‌فلزی تشکیل شده بر پایه Ni-Ti است. این مقدار سختی نسبت به سختی FeTi (۱۱۵۰ ویکرز) بسیار کمتر است و نشان می‌دهد با استفاده از لایه واسط نیکل خاص می‌توان به اتصالاتی با شرایط بسیار بهتر دست یافت.



الف



ب

شکل ۱۵- پروفیل میکروسختی نقاط مختلف در فصل مشترک اتصال در الف) زمان ۴۵ دقیقه ب) زمان ۶۰ دقیقه

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 میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر

جدول ۶- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل ۱۴ الف) بر

حسب درصد وزنی					
V	Al	Ni	Fe	Ti	
۰/۳	۱/۳	۲۴/۱	-	۷۴/۳	لایه I
-	۱/۵	۵۲/۲	۰/۴	۴۵/۹	لایه II
۰/۸	۲/۲	۳۲/۱	-	۶۴/۹	لایه III

جدول ۷- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل ۱۴ ب) بر

حسب درصد وزنی					
V	Al	Ni	Fe	Ti	
۰/۱	۰/۵	۲۳/۵	-	۷۵/۹	لایه I
-	۱/۱	۵۰/۴	۰/۴	۴۸/۱	لایه II
۰/۹	۲/۶	۳۲/۶	-	۶۲/۹	لایه III

۳-۳- بررسی خواص مکانیکی اتصال

در شکل ۱۵ نتایج آزمون سختی سنجی برای نمونه‌های متصل شده در زمان ۴۵ و ۶۰ دقیقه نشان داده 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 سختی برحسب ویکرز گزارش شده است. 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 و نیز نقطه‌های ۶، ۷ و ۸ در حوالی فصل مشترک لایه نیکل خالص و 17-4PH انتخاب شدند. همانطور که ملاحظه می‌شود، در فصل مشترک نیکل- فولاد، به دلیل عدم وجود فازهای بین‌فلزی، مقدار سختی افزایش قابل ملاحظه‌ای نیافته است. سختی در منطقه 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 شدت قابل مشاهده است. علت این افزایش، تشکیل ترکیبات بین‌فلزی NiTi، NiTi₂ و Ni₃Ti با سختی بالا است که عاملی منفی در اتصال محسوب می‌شود. با کاهش مقدار سختی در این ناحیه می‌توان به اتصالات مطلوب‌تری دست یافت. در این نمودار بیشترین سختی ثبت شده مربوط به نقطه شماره ۳ است که دقیقاً بر روی ترکیبات بین‌فلزی قرار گرفته است. این افزایش سختی با افزایش تردی نیز همراه است و در آزمون‌های

سانتیگراد، فازهای $\alpha\text{-Ti}+\beta\text{-Ti}$ و $\beta\text{-Ti}$ ، $\text{NiTi}_2+\text{Fe}_2\text{Ti}$ ، اتصال تشکیل می‌شوند.

(۲) کمترین میزان سختی (۵۶۲ ویکرز) در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه و بیشترین میزان سختی (۷۰۰ ویکرز) در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۶۰ دقیقه به دست می‌آید که مربوط به ترکیبات بین‌فلزی تشکیل شده بر پایه Ni-Ti است.

(۳) با افزایش زمان جوشکاری نفوذی از ۴۵ به ۶۰ دقیقه در دو دمای ثابت ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد، استحکام برشی به ترتیب از ۲۸۹ به ۳۰۳ و از ۱۸۶ به ۲۳۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد که دلیل این افزایش نفوذ عناصر و تشکیل پیوندهای مستحکم‌تر است؛ همچنین با افزایش دمای جوشکاری نفوذی از ۹۰۰ به ۹۵۰ درجه سانتیگراد در زمان‌های ثابت ۴۵ و ۶۰ دقیقه، استحکام برشی به ترتیب از ۲۸۹ به ۱۸۶ و از ۳۰۳ به ۲۳۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش بیش از حد نفوذ عناصر و گسترش عرض لایه‌های ترکیبات بین‌فلزی است.

(۴) در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ۴۵ دقیقه، نفوذ به قدری افزایش می‌یابد که حجم وسیعی از عناصر تیتانیوم، آلومینیوم و وانادیوم موجود در فلز پایه Ti6Al4V از لایه واسط عبور کرده و خود را به سمت فولاد PH 17-4 رسانده‌اند. این امر منجر به تشکیل ترکیبات بین‌فلزی مضر برپایه Fe-Ti و Fe-Cr-Ti می‌شود.

(۵) بهترین استحکام برشی اتصال در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۶۰ دقیقه به میزان ۳۰۳ مگا پاسکال به دست آمد.

۵- مراجع

- [1] Lee HS, Yoon JH, Park CH, Ko YG, Shin DH, Lee CS (2007) A study on diffusion bonding of superplastic Ti-6Al-4V ELI grade. J Mater Process Technol 187-188: 526-529.
- [2] 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.
- [3] 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. Weld word 60: 793-811.

متر تهیه گردید و سپس نمونه‌ها با استفاده از فیکسچر مخصوص تحت نیروی برشی قرار گرفتند. جدول ۸ میانگین استحکام برشی در شرایط دمایی و زمانی متفاوت را نشان می‌دهد. با افزایش زمان از ۴۵ به ۶۰ دقیقه، فرصت برای نفوذ عناصر بیشتر شده و مقدار بیشتری از اتم‌ها نفوذ می‌کنند؛ بنابراین عرض منطقه نفوذ افزایش می‌یابد. این امر منجر به افزایش استحکام برشی اتصال می‌گردد. با افزایش دما از ۹۰۰ به ۹۵۰ درجه سانتیگراد، استحکام برشی افت می‌کند. با توجه به تاثیر بیشتر دما نسبت به زمان در پدیده نفوذ، افزایش ۵۰ درجه‌ای در دما منجر به افزایش بیش از حد نفوذ و رشد ترکیبات بین‌فلزی شده است، به گونه‌ای که اثر رشد این ترکیبات از اثر عمق نفوذ بیشتر بوده و منجر به کاهش استحکام برشی شده است. بهترین استحکام برشی اتصال در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۶۰ دقیقه به میزان ۳۰۳ مگا پاسکال به دست آمد.

جدول ۸- میانگین استحکام برشی در شرایط دمایی و زمانی

متفاوت			
ردیف	دما (سانتیگراد)	زمان (ثانیه)	استحکام برشی (مگا پاسکال)
۱	۹۰۰	۴۵	۲۸۹
۲	۹۵۰	۴۵	۱۸۶
۳	۹۰۰	۶۰	۳۰۳
۴	۹۵۰	۶۰	۲۳۰

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر پارامترهای جوشکاری نفوذی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد رسوب سخت شونده PH 17-4 و آلیاژ Ti6Al4V با استفاده از لایه واسط نیکل خالص با ضخامت ۱۵۰ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور نمونه‌ها در کوره خلاء در سه دمای ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان ۴۵ و ۶۰ دقیقه تحت عملیات جوشکاری نفوذی قرار گرفتند. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل است:

(۱) در دماهای ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد، ترکیبات بین‌فلزی Ni_3Ti ، NiTi و NiTi_2 در مرز مشترک نیکل-تیتانیوم تشکیل می‌شوند، در حالیکه با افزایش دما به ۱۰۵۰ درجه

- and Ti alloy with and without interlayer: interface microstructure and strength properties. *Metall Mater Trans A* 45: 371–383.
- [16] Vigraman T (2021) Liquid-solid phase reaction products formation in the diffusion welded joints made between Ti-6Al-4V and AISI 304L with brass interlayer. *Mater Today* 42(2): 607-617.
- [17] 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* 21(3): 1467-1473.
- [18] Sabetghadam H, Zarei Hanzaki A, Araee A, Hadian A (2010) Diffusion bonding characteristics of 410 stainless steel/Cu with Ni interlayer. *J Mater Sci Technol* 26: 163-169.
- [19] Ranjan Kumar R, Kumar Gupta R, 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.
- [20] Atasoy E, Kahramanb N (2008) Diffusion bonding of commercially pure titanium to low carbon steel using a silver interlayer. *Mater Charact* 59: 1481-1490.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Aleman B, Gutiérrez I, Urcola JJ (1997) The use of Kirkendall effect for calculating intrinsic diffusion coefficients in a 316L/Ti6242 diffusion bonded couple. *Scripta Mater* 36: 509-515.
- [24] Ghosh M, Samar D, Banarjee PS, Chatterjee S (2005) Variation in the reaction zone and its effects on the strength of diffusion bonded titanium–stainless steel couple. *Mater Sci Eng A* 390: 217-226.
- [۲۵] سبکتین ریژی م، رضوی س غ، مناجاتی زاده ح (۱۳۹۱) اتصال نوردی تیتانیوم به فولاد با استفاده از لایه میانی نیکل. مجله مواد نوین ۳ (۲): ۶۷-۷۶.
- [26] Keyzer JD, Cacciamani G, Dupin N, Wollants P (2009) Thermodynamic modeling and optimization of the Fe-Ni-Ti system. *Calphad* 33: 109-123.
- [4] Thirunavukarasu G (2014) Effect of bonding temperature on interfacial reaction and mechanical properties of diffusion-bonded joint between Ti-6Al-4V and 304 stainless steel using nickel as an intermediate material. *Mater Sci* 45: 2067- 2088.
- [5] Muthupandi V, Muralimuhan CH (2014) Properties of friction welding titanium-stainless steel joints with a nickel interlayer. *Procedia Mater Sci* 5: 1120 -1129.
- [6] Muralimuhan CH, Ashfaq M, Ashiri R, Muthupandi V, Sivaprasad K (2016) Analysis and characterization of the role of Ni interlayer in the friction welding of titanium and 304 austenitic stainless steel. *Metall Mater Trans A* 47: 347–359.
- [7] 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.
- [8] Kundu S (2011) Interface microstructure and strength properties of Ti6Al4V and microduplex stainless steel diffusion bonded joints. *Mater Design* 32: 2997-3003.
- [۹] شجاعی زوارم ع (۱۳۹۱) جوشکاری غیرهمجنس آلیاژ حافظه دار نایتینول به Ti6Al4V با استفاده از لیزر ضربانی Nd:YAG و بررسی خواص اتصال. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- [10] Shiue RK, Wu SK, Chan CH, Huang CS (2006) Infrared brazing of Ti6Al4V and 17-4PH stainless steel with a nickel barrier layer. *Metall Mater Trans A* 37: 2207–2217
- [11] 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
- [12] 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.
- [13] 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 Design* 51: 714–722.
- [14] Sam S, Kundu S, Chatterjee S (2012) Diffusion bonding of titanium alloy to micro-duplex stainless steel using a nickel alloy interlayer: Interface microstructure and strength properties. *Mater Design* 40: 237-244.
- [15] Kundu S, Sam S, Mishra B, Chatterjee S (2014) Diffusion bonding of microduplex stainless steel