

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره1، بهار و تابستان 1399، صفحه 95-81

بررسی اثر پارامترهای فرآیند TLP بر ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی اتصال فولاد زنگنزن 316L به تیتانیوم خالص تجاری با لایه واسط مس خالص حامد ثابت^{*}، فرهاد عبدی، محسن قنبری حقیقی مرکز تحقیقاتی مهندسی مواد پیشرفته ، واحد کرج ، دانشگاه آزاد اسلامی ، کرج ، ایران. (دریافت مقاله: 1398/03/01 ؛ پذیرش مقاله: 1399/05/24)

چکیدہ

در این پژوهش اثر پارامترهای دما و زمان عملیات اتصال فاز مایع گذرا بر خواص مکانیکی، ریزساختار و مقاومت به خوردگی اتصال تیتانیوم خالص تجاری به فولاد ماد۵ مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از فویل مس خالص با ضخامت 100 میکرومتر به عنوان لایه واسط استفاده شد و عملیات اتصال دهی در سه دمای 900، 100 و 1050 درجه سانتی گراد و در سه زمان 90، 120 و 150 دقیقه انجام شد. پس از انجام عملیات اتصال دهی، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی نمونهها مورد ارزیابی قرار گرفت. نایج مین انجام شد. پس از انجام عملیات اتصال دهی، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی نمونه ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمون برش نشان داد استحکام برشی جوش در دمای اتصال 1000 درجه سانتی گراد از دماهای 900 و 1050 درجه سانتی گراد بهتر است. برش نشان داد استحکام برشی جوش در دمای اتصال 1000 درجه سانتی گراد از دماهای 900 و 1050 درجه سانتی گراد بهتر است. برسی نان داد استحکام برشی جوش در دمای اتصال 1000 درجه سانتی گراد از دماهای 900 و 1050 درجه سانتی گراد بهتر است. برسی این امر، کمتر تشکیل شدن ترکیبات بین فلزی در این دما و همچنین کم تربودن ناحیه انجماد غیرهمدما در این نمونه بود. بررسیهای رایز مار مای 950 درجه سانتی گراد از دماهای 950 و 1050 درجه سانتی گراد بهتر است. بررسیهای ریز ساختاری نشان داد که در دمای 950 درجه سانتی گراد ترکیب بین فلزی تیتانیوم و آهن تشکیل نشده است. درحالی که در دو دمای 000 و 1050 درجه سانتی گراد ترکیب بین فلزی تیتانیوم و آمان توجهی وجود داشت. نتایج آزمون ترکیبات بین فلزی به وجود آمده در این اتصال می توان به یوسی در کیبات بین فلزی به وجود آمده در این اتصال می توان به یولندی میتان و 1500 در و مقاومت به خوردگی ناحیه میتان در حالی در حمله در مای 500 و 1000 در 1000 در 1000 و 1000 در ترکیب بین فلزی می به مقدار قابل توجهی وجود داشت. در حمله خرودگی نشان داد که مقاومت به خوردگی ناحیه ورش، وابسته به ترکیبات بین فلزی به وجود آمده در این ناحیه است. از جمله ترویکی نازی به وجود آمده در این اتصال میتوان به ولیان برکیبات بین فلزی به خوردگی بهتری از مرمان در 1000 در مین از می میون بین فلزی می و تیتی میزه این در می میون در می میزه در می میز مین

كلمات كليدي: فرآيند فاز مايع گذرا، اتصال فلزات غير همجنس، فولاد 316L، تيتانيوم خالص تجاري.

Effect of the TLP process parameters on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel to pure commercial titanium joint with pure copper interface

H. Sabet^{*}, F. Abdi, M. Ghanbari Haghighi

Advanced Materials Engineering Research Center, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran. (Received 22 May 2019; Accepted 15 August 2020)

* نويسنده مسئول، پست الكترونيكي: <u>h-sabet@kiau.ac.ir</u>

Abstract

In this research, effect of time and temperature of TLP process on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of CP-Ti to 316L stainless steel joint evaluated. For this purpose pure copper foil with 100 μ m thickness was used as interlayer and joining process carried out at 950°C, 1000°C and 1050°C and for 90, 120 and 150 minutes. After the joining process, shear and micro-hardness test and corrosion resistance were applied in the samples. The test results revealed that the shear strength of the sample 1000°C is better than two other soaking temperatures. The main reason was the formation of less intermetallic compounds at the interface, as well as the presence of less athermally solidification zone area. Microstructural examinations for the sample after TLP at 950°C revealed no iron and titanium bearing intermetallic compounds in the interface while for two other samples, there exist considerable amount of intermetallics in the microstructure. Corrosion test results showed that the resistance against corrosion depends on the intermetallic compounds formed in the interface. Intermetallic phases includes FeTi, TiCu, Ti₂Cu, and TiCu₂. The sample prepared at 1000°C for 120 minutes had less intermetallic compounds and as a result, had the best corrosion resistance. Fe and Ti containing intermetallics had good corrosion resistance in simulated body fluid, as comparison with Ti and Cu containing compounds.

Keywords: Transitional liquid phase bonding process, Dissimilar metal bonding, 316 L steel, Commercial pure titanium.

فلز مورد اتصال قرار گیرد. در مرحله بعد با افزایش دمای مجموعه تا دمای ذوب لایه واسط (و یا ایجاد ترکیب یوتکتیک)، فاز مایع تشکیل میشود. در مرحله بعد با نفوذ این فاز مایع به فلزات پایه، و تغییر ترکیب شیمیایی، انجماد به صورت همدما صورت می گیرد. درصورتی که نمونه اتصال یافته به مدت بیشتری درون کوره قرار بگیرد، غلظت لایه واسط در سراسر فلزات پایه یکنواخت تر میشود و خواص مکانیکی اتصال بسیار نزدیک به فلزات پایه میشود (تا حدود 90 درصد فلزات یایه) [2 و3].

اتصال فلزات غیرهمجنس از آن جهت حائز اهمیت است که ترکیبی از خواص را برای ما به ارمغان خواهد آورد. به عنوان مثال فلز تیتانیوم با مقاومت به خوردگی عالی در مخازن تحت فشار و مبدلهای حرارتی به کار می رود. حال اگر این مخازن در مدت زمان زیاد تحت دمای بالا قرار گیرند، نیاز است که ضخامت این مخازن افزایش یابد که به سبب هزینه بالای تیتانیوم، اتصال این فلز به فلزات ارزانتر مثل فولاد مطرح میشود. ایجاد اتصال بین تیتانیوم و فولاد با روش های ذوبی مشکل است و سبب ایجاد فازهایی مضر مانند FeTi و Ti میشود. در نتیجه به سراغ روشهای حالت جامد برای این دو اتصال باید رفت. فرآیند فاز مایع گذرا برای اتصال این دو فلز گزینه مناسبی است [4]. فرآیند اتصال فاز مایع گذرا فرآیندی است که در آن فلزات با استفاده از یک لایه واسط از جنس فلز یایه و یا مواد دیگر، اتصال مي يايند. لايه واسط بين دو فلز مورد اتصال قرار داده مے شود و با ذوب آن و تشکیل یک فاز مذاب بین دو سطح فلز مورد اتصال، و نفوذ به درون فلزات پایه و انجماد همدما، سبب ايجاد اتصال مي شود. در اين فرآيند يس از نفوذ كامل لايه واسط و همگن سازی می توان به استحکام حدود 90 درصد فلز یایه دست یافت. در این فرآیند برخلاف جوشکاری نفوذی، میزان اعمال فشار بر قطعات مورد اتصال چندان اهمیتی ندارد [1]. فرآیند اتصال فاز مایع گذرا یک روش نوین است که به دلیل امکان اجرا برای قطعات پیچیده و بزرگ، امکان اجرای اتصال به صورت همزمان برای تعداد زیادی از قطعات، نیاز نداشتن به تجهيزات خاص، دماي ذوب بالاي مجدد محل اتصال (و درنتیجه افزایش دمای کاری قطعه) و پایین بودن میزان اعوجاج و عيوب جوشكاري، نسبت به ساير فرايندها برتري دارد. این فرآیند شامل چهار مرحله است: بستن قطعات روی هم با استفاده از نگهدارنده¹، ذوب لایه واسط، انجماد به صورت همدما و همگن سازی. در مرحله اول قطعات با استفاده

از یک نگهدارنده به طریقی بسته میشود که لایه واسط بین دو

1-Fixture

1- مقدمه

از دیگر کاربردهای اتصال فولاد 316L به تیتانیوم خالص مي توان به كاربردهاي يزشكي اين اتصال مانند مفاصل مصنوعي و ايمپلنتهاي استخواني اشاره نمود. فولاد 316L و تيتانيوم هر دو در تماس مستقیم با مایعات بیولوژیکی، مقاوم در برابر خوردگی هستند و پاسخ بیولوژیکی خوشخیم و بیخطر میدهند. بسیار مهم است که ایمپلنت جراحی در هنگام قراردادن در بدن انسان در معرض خوردگی نباشد تا از احتمال بروز عفونت جلوگیری کند. متأسفانه، تیتانیوم در صورت قرارگرفتن در معرض هیدروژن، نیتروژن و اکسیژن به راحتی آلوده میشود که میتواند بر روند خوردگی در این فلز تأثیر بگذارد و ممکن است استفاده از آن را در برخی از کاربردهای پزشکی به خطر بیندازد. از طرفی ویژگیهایی همچون وزن کم تیتانیوم، استحکام زیاد در برابر فشارهای مکرر و مدول الاستيسيته كمتر نسبت به فولاد (كه باعث عدم تمركز تنش و پخش نیرو در استخوان می شود)، استفاده از تیتانیوم را ترغیب مي كنند. لذا اتصال تيتانيوم به فولاد 316L اهميت پيدا مي كند.

در پژوهشی که توسط Tillmann و همکارش [6] انجام شد، از فلز مس خالص به عنوان لايه واسط براي اتصال فولاد ساده کربنی به فلز تیتانیوم خالص از روش اتصال فاز مایع گذرا استفاده شد. عملیات اتصال در دمای 850 درجه سانتی گراد و به مدت زمان های 30، 60، 90 و 180 دقیقه انجام شد. هدف از این پژوهش بررسی اثر زمان فرآیند بر خواص مکانیکی اتصال در دمای 850 درجه سانتی گراد بود. نتایج تحقیق آنان نشان داد که اتصال مناسبی در دمای 850 درجه سانتیگراد در همه زمان های 30، 60، 90 و 180 دقیقه به وجود آمده بود. ترکیبات بینفلزی بین فلزات آهن-تیتانیوم و مس-تیتانیوم در منطقه اتصال به وجود نیامده بود. افزایش زمان اتصال دهی تا 90 دقیقه باعث افزایش استحکام شد. اما افزایش زمان اتصالدهی تا 180 دقيقه باعث كاهش استحكام شد. علت أن افزايش مقدار ناپیوستگی بود. پس از آزمون برش و شکست قطعات، در فصل مشترک ناحیه اتصال و تیتانیوم ترکیب بین فلزی Ti₂Cu و TiCu به مقدار کمی دیده شد.

در پژوهشی که توسط Cavalli و همکارش [7] صورت گرفت، اتصال فلز تیتانیوم خالص تجاری و فولاد زنگ نزن 304 با دو لایه واسط مختلف مس و نقره انجام شد. دمای انتخابی برای لايه واسط نقره، 980 و 1030 درجه سانتي گراد و زمان 10 ساعت و 30 ساعت بود. دماها و زمانهای انتخابی برای زمانی که از لایه واسط مس استفاده شد نیز به ترتیب 900 و 1000 درجه سانتی گراد به مدت 10 ساعت بود. ایشان گزارش دادند که ریزساختار ناحیه اتصال به شدت وابسته به دما، زمان و نوع لايه واسط است. زماني كه لايه واسط نقره مورد استفاده قرار گرفت، در دمای 980 درجه سانتی گراد و زمان 10 ساعت، ترکیب بین فلزی AgTi در ناحیه اتصال دیده شد. با افزایش دما به 1030 درجه سانتی گراد و افزایش زمان به 30 ساعت، ترکیب بینفلزی AgTi₂ بیشتری مشاهده شد. زمانی که مس به عنوان لايه واسط استفاده شد، محلول جامد تيتانيوم و مس تشكيل شده بود و فازهای پیوسته بینفلزی کمی مشاهده شد. بیشترین استحکام برشی مربوط به زمانی بود که از لایه واسط مس استفاده شد و مقدار آن 502 مگاپاسکال گزارش شد. همچنین، برای زمانیکه از لایه واسط نقره استفاده شده بود، استحکام برشى 160 مگاپاسكال به دست آمد.

در پژوهشی که توسط جلالی و همکارانش [8] انجام شد، اتصال فولاد زنگ نزن دوفازی UNS 32750 به آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بررسی شد. در این پژوهش از لایه میانی مس استفاده شد و دماهای 890، 920، 920و 980 درجه سانتی گراد و زمان 60 دقیقه برای انجام فرآیند درنظر گرفته شد. بررسیهای ایشان نشان داد که اتصال سالم و بدون عیبی در مایع گذرا به دست میآید و هیچ گونه ناپیوستگی در منطقه اتصال ایجاد نمی شود. نتایج به دست آمده نشان داد که زمان فرآیند پارامتر بسیار موثر در پهنای ناحیه اتصال است. با افزایش زمان اتصال، پهنای ناحیه فصل مشترک افزایش یافت. همچنین زمان فرآیند در دمای انجام فرآیند نیز تاثیر داشت. توسط آزمون پراش اشعه ایکس، فازهای تشکیل شده تشخیص داده شدند.

فازهای مشاهده شده عبارتند بودند از: TiCu₃ ،FeTi ، TiCu : Cr₂Ti ،FeTi₂ و Cr₂Ti . مقدار میکروسختی در ناحیه اتصال از فلزات پایه بیشتر شد که علت این امر به وجود آمدن فازهای بین فلزی سخت و ترد بود.

در پژوهشی که توسط زکی پور و همکارانش [9] انجام شد، اتصال فولاد زنگ نزن Jac به آلیاژ تیتانیوم 4V–Ait از روش اتصال فاز مایع گذرا با استفاده از لایه واسط مس مورد بررسی قرار گرفت. پارامتر متغیر در این پژوهش، ضخامت لایه واسط مس بود. این پژوهش در دو دمای 000 و 600 درجه سانتی گراد و زمان 60 دقیقه با لایه های واسط 25. 50 و 100 میکرومتر انجام شد. نتایج آنان نشان داد که ترکیبات مختلف بین فلزی در ناحیه اتصال تشکیل شده است. افزایش ضخامت لایه واسط، باعث عدم انجام فرآیند اتصال در زمان 60 دقیقه شد. حداکثر مقاومت برشی 220 مگاپاسکال برای اتصال ایجادشده در 000 درجه سانتی گراد و زمان 60 دقیقه بود. افزایش دمای اتصال به 960 درجه سانتی گراد، باعث کاهش استحکام، به دلیل افزایش عرض ناحیه اتصال و ایجاد ترکیبات

در پژوهشی که توسط Yingling Wang و همکاران [10] انجام شد، اتصال فولاد زنگ نزن 304 و آلیاژ TiNi از طریق فرآیند فاز مایع گذرا با استفاده از لایه واسط مس-نقره بررسی شد. فرآیند در دمای 860 درجه سانتی گراد و زمان 60 دقیقه انجام شد. نتایجی که توسط این دو محقق حاصل شد نشان داد که شد. نتایجی که توسط این دو محقق حاصل شد نشان داد که ترکیبات بینفلزی متعددی در فصل مشترک به وجود آمده است. این ترکیبات بینفلزی عبارتند از: TiNi₄،Ti₂Ni iticu₃،Ti₃Ni₄ (Ti₂Ni با ت است. این ترکیبات بینفلزی عبارتند از: TiNi مقاومت به خوردگی شد. همچنین مقاومت به خوردگی ناحیه جوش به شدت وابسته به ترکیبات بینفلزی به وجود آمده، درشت ساختار و کیفیت سطحی بود.

در پژوهشی که توسط Shuying Liu و همکارانش [11] انجام شد، ساختار فصل مشترک و مکانیزم شکست اتصال آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V و فولاد زنگ نزن 304 با استفاده از فرآیند

اتصال فاز مایع گذرا با لایه واسط مس بررسی شد. دمای انجام فرآیند 850، 900، 950 و 1000 درجه سانتی گراد و زمان آن 30، 60 و 90 دقیقه بود. نتایج ایشان نشان داد زمانی که فشار اعمالی بر قطعات حدود 5 مگاپاسکال است، استحکام برشی ابتدا افزایش و سپس با افزایش دما و یا زمان، کاهش مییابد. حداکثر استحکام برشی زمانی به دست آمد که دمای انجام فرآیند 950 درجه سانتی گراد و زمان آن 60 دقیقه بود. این مقدار حداکثر استحکام برشی برابر با 163 مگاپاسکال بود. مایع گذرا، بر خواص مکانیکی، ریزساختار و مقاومت به خوردگی اتصال تیتانیوم خالص تجاری به فولاد 161 با

2- روش تحقيق

برای انجام فرآیند اتصال فاز مایع گذرا، ورقه هایی از جنس تیتانیوم خالص گرید 2 ساخت شرکت چینی Jiangsu Hongbao فولاد لما316 و فویل مسی تهیه شد. به منظور تطبیق ترکیب شیمیایی فولاد لما316 و تیتانیوم گرید 2 و فویل مسی با ترکیب شیمیایی مورد نظر، نمونهها مورد آزمون اسپکتروسکوپی نشر نوری¹ قرار گرفتند. ترکیب شیمیایی فولاد لما316 و تیتانیوم خالص گرید 2 به ترتیب در جدول (1) و (2) ارائه شده است. از آنجاکه ضخامت لایه واسط باید حداکثر 100 میکرومتر انتخاب شود [12]، بنابراین پس از تهیه ورق مسی به ضخامت انتخاب شود نظر برسد. ترکیب شیمیایی لایه واسط با استفاده از آزمون اسپکتروسکوپی نشر نوری به دست آمد و در جدول (3) ارائه شده است.

ابعاد نمونه های آزمایش مطابق استاندارد AWS C3 تهیه شد (شکل (1)). پس از تهیه ورقهایی به ضخامت 3 میلیمتر از فولاد 316L و تیتانیوم خالص تجاری گرید 2 تعداد 27 قطعه از آنها به ابعاد 3 سانتیمتر در 13 سانتیمتر برش داده شد. به

Downloaded from intjournals.iut.ac.ir on 2024-05-07]

¹⁻ Optical emission spectrometry

منظور نگهداری ورقها روی هم در درون کوره، فیکسچرهایی ساخته شد. این فیکسچرها باید در دمای کوره ذوب نشوند و تغییر شکل نیز ندهند. لذا از قوطی توپر با مقطع مربع و از جنس فولاد ساده کربنی استفاده شد.

ولاد&316	۔ وزنی) ف	میایی (درصد	تركيب شيه	جدول1-
С	Mn	Si	Р	S
•/• 49	1/19.	•/7/ •	•/ • 5 5	•/• 7٨
Cr	Mo	Ni	N	Fe
17/19.	7/71.	17711.	7/01.	پايه

جدول2- تركيب شيميايي (درصد وزني) تيتانيوم خالص تجاري

Ν	C	Н	Fe	0	Ti
•/•**	•/•V0	•/• ١٤	•/7٧•	•/73•	ڀايه

جدول3- تركيب شيميايي (درصد وزني) فويل مسي

Cu	0	Mn	Fe	Ni
٩٩/٨٠٠	•/•∀٥	*/ * 1V	•/•10	•/ • ٣ •

بعد از آماده سازی نمونه ها و بستن آنها روی فیکسچر، عملیات فاز مایع گذرا بر روی آنها انجام شد.سه دمای 1050،

1000 و 950 درجه سانتی گراد انتخاب و برای هر دما، سه زمان اتصال دهی 90 دقیقه، 120 دقیقه و 150 دقیقه انجام شد. هر 3 نمونه به صورت یکجا درون کوره قرار داده و همزمان نیز از کوره خارج شدند. کوره مورد استفاده، تولید شرکت ATBIN بود و دارای سرعت گرمایش 10 درجه سانتی گراد بر دقیقه بود. اتمسفر کوره نیز هوای آزاد انتخاب شد. علت انتخاب دماهای مذکور ناشی از تشکیل یوتکتیک فلز مس و تیتانیوم در دماهای مذکور ناشی از تشکیل یوتکتیک فلز مس و تیتانیوم در دماهای از این دو دما انتخاب شد تا فاز مذاب تشکیل و سپس در اثر زمانهای مذکور، تحقیقات قبلی محققین می باشد [6]. به منظور مشخص کردن هر نمونه و قابلیت تفکیک نمونهها از هم، نمونهها کدگذاری شدند. این کدگذاری در جدول (4) ارائه شده است.

برای انجام آزمون برش، برای هر دما و زمان تعداد 2 نمونه درنظر گرفته شد. پس از انجام آزمون و شکست نمونه، از بین 2



شكل1- ابعاد قطعه براي انجام جوشكاري طبق استاندارد AWS C3.

		.
زمان انجام فرآيند(دقيقه)	دمای انجام فرآیند (درجه سانتیگراد)	شماره نمونه
90	950	1
120	950	2
150	950	3
90	1000	4
120	1000	5
150	1000	6
90	1050	7
120	1050	8
150	1050	9

الون، الأخطوة متعاري عمو معنا يوالي الأجام فرايسا عار ماييم العاران	گذرا.	فرآيند فاز مايع	برای انجام	گذاری نمونهها	نحوه شماره	جدول4-
---	-------	-----------------	------------	---------------	------------	--------

نمونه درنظر گرفته شده، نمونه ای که حداکثر استحکام را دارا بود به عنوان نتیجه آزمون برش برای آن دما و زمان معیار قرار داده شد. حداکثر استحکام برشی نیز از رابطه (1) محاسبه شد [13]: (1) حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه = استحکام برشی سطح مقطع

به منظور آماده سازی نمونه ها برای انجام متالو گرافی، از استاندارد ASTM E3 استفاده شد. برای انجام بررسی ریز ساختار اتصال، نمونه ها از محل روی هم قرار گرفتگی، به صورت عرضی بریده شدند. بعد از برش قطعات و پس از انجام آماده سازی سطحی شامل سنباده (به ترتیب 100، 400، 600) آماده سازی سطحی شامل سنباده (به ترتیب 100، 400، 600) محلول پودر آلومینا و آب به نسبت 1 به 10)، قطعات آماده جهت انجام حکاکی شدند. ترکیب محلول حکاکی مورد استفاده با نام Keroll بود که در جدول (5) ارائه شده است.

پس از حکاکی، کلیه نمونه ها با میکروسکوپ نوری مدل Meiji مورد بررسی ساختاری قرار گرفتند. همچنین جهت بررسی دقیق تر فازهای حاصل در محل اتصال از دستگاه SEM SERON TECH در محل اتصال از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Ais2300c الکترون ثانویه¹ و ولتاژ کاری kV استفاده شد. همچنین آنالیز نقطهای²، آنالیز خطی³ و نقشه عناصر آلیاژی⁴ از نمونههای منتخب تهیه شد. همچنین جهت بررسی ضخامت فصل مشترک، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد که ضخامت فصل مشترک را بر

به منظور شناسایی ترکیبات بین فلزی به وجود آمده، نمونهها مورد آزمون پراش پرتو ایکس⁵ قرار گرفتند. دستگاه XRD مورد استفاده PHILIPS-D6792 ساخت هلند بود که از کاتد مسی جهت آزمون استفاده شد و با اندازه گام⁶ 0/05 درجه

- 1-Secondary electron
- 2 -Spot analysis
- 3 -Line scan
- 4 -Mapping alloy
- ۵ -X-Ray diffraction
- ۶ -Step size

آزمون انجام گرفت. آزمون میکروسختی مطابق استاندارد ASTM E384 انجام گردید. دستگاه مورد استفاده برای آزمون میکروسختی، گردید. دستگاه مورد استفاده برای آزمون میکروسختی، BOHLER-ILLINOIS 60044 بود که قابلیت اندازه گیری مسختی بر حسب معیار ویکرز را داشت. برای هر نمونه، آزمون میکروسختی بر روی 6 نقطه از سطح فولاد تا سطح تیتانیوم مطابق تصویر نشان داده در شکل (2) انجام شد. لازم به ذکر است که مقدار نیروی اعمالی 100 گرم و زمان اثر نیز 10 ثانیه تنظیم شد. جهت انجام آزمایش خوردگی (شرایط مشابه با شرایط بدن) از مایع شبیه سازی شده بدن⁷ که یک محلول با غلظت یونهای نزدیک به پلاسمای خون انسان است و در شرایط خفیف Hq و دمای فیزیولوژیکی یکسان نگهداری می شود استفاده شد. جدول (6) غلظت یونهای مایع شبیه سازی شده بدن و پلاسمای خون انسان را ارائه می دهد.

جدول5- تركيب شيميايي محلول اچ مورد استفاده

نوع ماده مصرفي	HF	HNo ₃	HCl
مقدار ماده مصرفي	5 مىلىلىتر	15 مىلىلىتر	10 مىلىلىتر

آزمون خوردگی در محیط شبیه سازی شده بدن⁸، مطابق استاندارد ASTM G5 مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور قطعات از ناحیه اتصال به صورت عرضی برش خورد (شکل (3)) و پس از علامت گذاری، همگی درون یک بشر که حاوی 100 میلی لیتر محلول شبیه سازی شده بدن بود قرار گرفتند. بشر حاوی نمونه ها به مدت زمان 21 روز (3هفته)، درون دستگاه انکوباتور قرار گرفت. دستگاه انکوباتور، دما را به طور دقیق روی 37/3 درجه سانتی گراد (دمای بدن) نگه داشت.

قبل از قراردادی نمونهها در محلول، ورن هر نمونه به طور دقیق با ترازوی دیجیتال (دارای دقت اندازه گیری تا 4 رقم اعشار) اندازه گیری شد. پس از گذشت مدت زمان 21 روز، نمونهها از محلول خارج و مجدد با ترازوی دیجیتال وزن شدند. از روی

v -Simulation body fluid

^{8 -}Simulated body fluid



شکل2- طرحوارهای از نقاط میکروسختی گرفته شده.

(mmo		
پلاسمای خون انسان	محلول شبيه سازي شده بدن	يون
142	142	Na ⁺
5	5	\mathbf{K}^+
1/5	1/5	Mg^{2+}
2/5	2/5	Ca ²⁺
103	147/8	Cl
27	4/2	HCo3 ⁻
1	1	HPo4 ²⁻
0/5	0/5	So4 ²⁻

جدول 6- غلظت یون های مایع شبیه سازی شده بدن و پلاسمای خون انسان.

میزان کاهش وزن هر نمونه، درصد کاهش وزن نمونه ها بر اساس رابطه 2 تعین شد [14]:

3- بحث و بررسی

نتایج آزمایش های برش برای قطعات جوش داده شده در دماها و زمان های مختلف در جدول (7) قابل مشاهده است. بررسی جدول (7) مشخص می کند که بیشترین استحکام برشی، مربوط به نمونه اتصال یافته در دمای 1000 درجه سانتی گراد و زمان 150 دقیقه به مقدار حدود 47 مگاپاسکال است. علت بالابودن استحکام برشی این نمونه و سایر نمونه های اتصال یافته در دمای 1000 درجه سانتی گراد، این است که در این دما تمایل به

تشکیل محلول جامد بالاتر از تشکیل ترکیب بینفلزی است [15]. کمترین استحکام برشی نیز مربوط به نمونه اتصالیافته در دمای 950 درجه سانتیگراد و زمان 90 دقیقه است. نفوذ کم به دلیل کمبودن دما و زمان باعث عدم نفوذ لایه واسط مس به فلزات پایه میشود و در نتیجه استحکام این نمونه پایین است. شکل (4) نمودار مقایسهای استحکام برشی نمونههای مختلف را نشان می دهد.

از آنجا که بیشترین استحکام برشی مربوط به نمونه شماره 6 (نمونه اتصال یافته در دمای 1000 درجه سانتی گراد و زمان 150 دقیقه)، و کمترین استحکام برشی نیز مربوط به نمونه شماره 1 (نمونه اتصال یافته در دمای 950 درجه سانتی گراد و زمان 90 دقیقه) بود، لذا ریزساختار این دو نمونه در این قسمت

مورد بررسی قرار گرفته شد.



شکل3- طرحوارهای از ابعاد نمونه ها برای آزمون خوردگی.

شکل (5) ریزساختار اتصال نمونه 1 را نشان می دهد. بررسی شکل (5) نشان می دهد که ضخامت فصل مشترک از 100 میکرومتر اولیه، به مقدار حدود 110 میکرومتر افزایش یافته و پهن تر شده است. در این دما و زمان، نفوذ لایه واسط به فلزات پایه بسیار کم بوده است (مطابق شکل (7)). یک لایه در فصل مشترک فلز تیتانیوم و لایه واسط دیده می شود که احتمالا تركيبات بينفلزي تيتانيوم-مس است. ميزان اين لايه با افزايش زمان افزایش خواهد یافت. وجود ساختارهای یوتکتیکی در نمونه شماره 1 به معنای عدم کامل بودن انجماد است [16]. در این نمونه ساختار از نواحی انجماد غیرهمدما¹، انجماد همدما² و ناحیه متاثر از نفوذ³ تشکیل شده است [17]. در این نمونه همانطور که در شکل (5) دیده می شود، عمده فصل مشترک از ناحیه انجماد همدما تشکیل شده است که بر خواص مكانيكي تاثير منفي دارد [17]. شكل (6) سطح شكست نمونه شماره 1 را نشان میدهد در جدول (8) آنالیز نقطهای نمونه 1 ارائه شده است.

همانگونه که از نتایج جدول (8) مشخص است، در نقطه شماره 1، درصد اتمی مس 35 و درصد اتمی تیتانیوم 63 است. بنابراین نقطه شماره 1 آنالیز فاز Ti₂Cu را نشان میدهد که

- 1 -Athermally solidified zone
- 2 -Isothermally solidified zone
- 3 -Diffusion affected zone

مقدار کمی سایر عناصر در آن حل شدهاند. از آنجا که سطح شکست مورد آنالیز نقطهای قرار گرفته است، میتوان این نتیجه را گرفت که شکست در فصل مشترک لایه واسط و فلز پایه تیتانیوم اتفاق افتاده است.

مختلف.						
استحكام برشي	حداکثر نیروی تحمل شدہ	شماره				
(مگاپاسکال)	(نيو تن)	نمونه				
10/55±0/03	2850±10	1				
12/59±0/03	3400±10	2				
32/96±0/03	8900±10	3				
42/59±0/03	11500±10	4				
46/29±0/03	12500±10	5				
47/03±0/03	12700±10	6				
35/55±0/03	9600±10	7				
33/33±0/03	9000±10	8				
27/03±0/03	7300±10	9				

جدول7- نتایج ازمون برش برای نمونههای اتصالیافته در دماها و زمانهای

بررسی نتایج جدول (8) مشخص میکند که در نقطه شماره 2، درصد اتمی مس 51 و درصد اتمی تیتانیوم 46 است. بنابراین نقطه شماره 2 آنالیز فاز TiCu را نشان میدهد که مقدار حدود 1 درصد آهن در آن حل شده است. از آنجاکه سطح شکست مورد آنالیز نقطهای قرار گرفته است، میتوان این نتیجه را گرفت که شکست در فصل مشترک لایه واسط و فلز پایه تیتانیوم اتفاق افتاده است. شکل (7) آنالیز خطی عنصر مس را نشان می دهد.

همان گونه که از شکل (7) مشخص است، مس در محدوده اتصال متراکم بوده است. به عبارت دیگر نفوذ مس به فلزات پایه بسیار کم بوده است. علت کمبودن نفوذ، دما و زمان کم است. شکل (8) نقشه توزیع عناصر برای نمونه شماره 1 را نشان میدهد. همان طور که در شکل نمایان است، نفوذ عناصر



شکل4- استحکام برشی نمونههای اتصالیافته در دماها و زمانهای مختلف.



شكل 5- ريزساختار اتصال ايجادشده نمونه شماره 1.

وسیعتر شده است [17]. افزایش دما و زمان نگهداری باعث افزایش میزان نفوذ می شود و در نتیجه وسعت منطقه انجماد هم دما افزایش یافته است. با افزایش منطقه انجماد همدما و کاهش منطقه انجماد غیرهمدما، استحکام افزایش یافته است [17]. شکل (11) سطح شکست نمونه شماره 6 را نشان می دهد در جدول (8) نیز آنالیز نقطهای نمونه مذکور ارائه شده است. نتایج جدول (8) مشخص می کند، در نقطه شماره 3، درصد اتمی کروم 18 و درصد اتمی تیتانیوم 19 و درصد اتمی آهن نشان می دهد که مقدار قابل توجهی تیتانیوم و کروم در آن حل شده است. با توجه به علام نفوذ عنصر آهن در فصل نمونه و از طرفی با توجه به عدم نفوذ عنصر آهن در فصل مشترک (در آنالیز خطی و نقشه توزیع عناصر)، می توان ایـن در یکدیگر بسیار کم است و این به دلیل دما و زمان کم در این نمونه هست. نرخ نفوذ ارتباط مستقیمی با دما و زمان دارد [8] و با افزایش دما و زمان در نمونه های 2 و 3 شاهد افزایش نفوذ عناصر در یکدیگر و پهنترشدن فصل مشترک هستیم. شکلهای (9) و (10) ریزساختار اتصال نمونه 6 را نشان میدهد. همان گونه که در شکل (10) دیده میشود، ضخامت فصل مشترک از 100 میکرومتر اولیه، به مقدار حدود 695 میکرومتر افزایش یافته و پهنتر شده است. در این دما و زمان، لایه ضخیمی از ترکیبات بینفلزی در فصل مشترک فلز تیتانیوم و لایه واسط دیده میشود. این لایه در نمونه شماره 1 نیز وجود داشت، اما پهنای آن بسیار کمتر بود. در این نمونه (نمونه شماره 6)، با افزایش دما و زمان اتصال، کسر حجمی ساختار یوتکتیکی در منطقه اتصال کاهش یافته و منطقه انجماد همدما



شكل 6- سطح شكست نمونه شماره 1.

نمونهها.	شكست	سطح	شيميايي	اناليز	جدول8-

عنصر آلیاژی				در صد	نقطه آناليز گرفته شده	
Ti	Cr	Fe	Ni	Cu	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	5 5.
62/916	0/441	0/427	0/809	35/408	درصد اتمی	(1
56/247	0/428	0/445	0/886	41/995	درصد وزني	لقطة ٦ (دموقة شمارة٦)
46/021	0/409	1/058	0/752	51/760	درصد اتمی	(1,1,1, ;; ,; ; 2, aba;
39/238	0/379	1/051	0/786	58/546	درصد وزني	لعطه 2 تمونه شماراته)
19/731	18/469	55/949	4/929	0/923	درصد اتمی	(6
17/574	17/856	58/099	5/381	1/090	درصد وزني	لفظه 5 (کمونه شماره ۵)
48/792	1/800	22/431	8/646	18/332	درصد اتمی	(6
43/636	1/747	23/389	9/478	21/750	درصد وزني	لفظه ۲ (نمونه شماره ۵)
12/554	9/812	71/302	3/815	2/517	درصد اتمی	(6, 1, 2, 2, 2) 5, 1, 2;
10/978	9/314	72/698	4/089	2/921	درصد وزنى	نقطه 5 (نمونه سماره 0)

آهن 71 و درصد اتمی تیتانیوم 12 و درصد اتمی کروم 9 درصد میباشد. بنابراین، نقطه شماره 5 محلول جامدی از آهن را نشان می دهد که سایر عناصر در آن حل شدهاند. شکل (12) آنالیز خطی عناصر مس، تیتانیوم و آهن برای این نمونه را نشان می دهد.

همانگونه که از شکل (12) مشخص است، مس در فولاد به خوبی نفوذ کرده است. نفوذ مس در فلز تیتانیوم بسیار ناچیز میباشد. همچنین فلز تیتانیوم به خوبی در فصل مشترک نفوذ کرده است. از طرفی عنصر آهن در فصل مشترک خیلی کم نفوذ کرده است. نفوذ تیتانیوم در فصل مشترک بسیار زیاد است نتیجه را گرفت که شکست در این نمونه در مرز آلیاژ فولاد و فصل مشترک اتفاق افتاده است. همچنین وجود تیتانیوم نشان میدهد که تیتانیوم نفوذ بسیار بالایی دارد، از لایه واسط عبور میکند و تا فلز پایه فولاد میرسد. از طرفی کمبودن درصد اتمی مس نیز حکایت از نفوذ مس به تیتانیوم دارد.

جدول (8) مشخص مینماید که در نقطه شماره 4، درصد اتمی آهن 22 و درصد اتمی تیتانیوم 48 و درصد اتمی مس 18 درصد است. بنابراین نقطه شماره 4 آنالیز فاز FeTi را نشان میدهد که مقدار 21 درصد مس در آن حل شده است. نتایج جدول (8) مشخص میکند که در نقط ه شماره 5، درصد اتمی

و این به دلیل بالابودن ضریب نفوذ تیتانیوم در مس هست [8]. شکل (13) نقشه توزیع عناصر برای نمونه شماره 6 را نشان می دهد.

شکل (13) (نقشه توزیع عناصر) نشاندهنده این موضوع است که نفوذ عناصر در یکدیگر تقریباً خوب بوده است. عمده عنصر مس به سمت فولاد نفوذ کرده است و عنصر تیتانیوم به مقدار زیادی در فصل مشترک نفوذ کرده است. شکست در این نمونه از فصل مشترک جوش اتفاق افتاده است. به دلیل این که فاز بین فلزی آهن و تیتانیوم (FeTi) زیادی در مس به مقدار دیده شدهاند. نفوذ مس در آهن و تیتانیوم در مس به مقدار

زیادی دیده می شود. در نمونههای اتصالیافته در دمای 950 درجه سانتی گراد و زمانهای اتصالدهی 90، 120 و 150 دقیقه، زیادبودن منطقه انجماد غیرهمدما سبب افت خواص مکانیکی شده است که با افزایش زمان اتصالدهی و کاهش ناحیه اتصال غیرهمدما، استحکام کششی بهبود یافته است. در نمونههای اتصالیافته در دمای 1000 درجه سانتی گراد نیز با افزایش زمان اتصالدهی، منطقه انجماد غیرهمدما کاهش می یابد که سبب افزایش خواص مکانیکی شده است. در نمونه های اتصالیافته در دمای 1050 درجه سانتی گراد با افزایش زمان اتصال دهی،



شكل 8- نقشه توزيع عناصر براي نمونه شماره 1.



شکل9- تصویر میکروسکوپی نوری اتصال ایجادشده در نمونه شماره 6.



شكل10- ريزساختار اتصال ايجادشده در نمونه شماره 6.

نگهداشته شده در کوره به مدت 120 دقیقه، بیشترین مقاومت به خوردگی را داشته است. افزایش یا کاهش زمان اتصال از 120 دقیقه در این دما، کاهش مقاومت به خوردگی را به همراه داشته است. علت این امر، کمبودن محلول جامد در زمان 90 دقیقه است که با افزایش زمان به 120 دقیقه، مقدار محلول جامد افزایش مییابد و بنابراین مقاومت به خوردگی بهبود مییابد. افزایش زمان بیشتر از 120 دقیقه، باعث به وجود آمدن فازهای افزایش زمان بیشتر از 120 دقیقه، باعث به وجود آمدن فازهای ضعیفی دارند و بنابراین مقاومت به خوردگی کاهش پیدا کرده است. نمونههای اتصالیافته در دمای 1050 درجه سانتی گراد، با افزایش زمان اتصال با کاهش مقاومت به خوردگی مواجه تیتانیوم به فولاد، ترکیبات بینفلزی FeTi زیادی تشکیل شده است که باعث افت خواص مکانیکی می شود. جدول (9) نتایج آزمون خوردگی نمونه های مختلف را در محلول شبیه سازی شده بدن نشان می دهد. شکل (14) به منظور مقایسه میزان کاهش وزن نمونه های مختلف است. همان گونه که در شکل (14) دیده می شود، نمونه های اتصالیافته در دمای 950 درجه سانتی گراد، با افزایش زمان اتصال (نگهداری در کوره)، مقاومت به خوردگی بهتری پیدا می کنند. علت این امر، به وجود آمدن محلول جامد بیشتر با گذشت زمان است که مقاومت به خوردگی خوبی دارد. نمونه های اتصالیافته در دمای 1000 درجه سانتی گراد، از روند خاصی پیروی نمی کند و نمونه



شكل11- سطح شكست نمونه شماره 6.



شكل 13- نقشه توزيع عناصر براي نمونه شماره 6.

شدهاند. علت این امر به وجود آمدن فازهای بینفلزی آهن و 4- **نتیجهگیری** تیتانیوم مثل FeTi است که مقاومت به خوردگی کمی دارند. -کمترین استحک

-كمترين استحكام برشي مربوط به نمونه اتصال يافته در دماي

درصد کاهش	وزن نمونه بعد از غوطه وری در محلول SBF	وزن نمونه قبل از غوطه وری در محلول SBF	شماره
وزن	(گرم)	(گرم)	نمونه
1/62	2/1550±0/0001	2/1905±0/0001	1
1/55	2/1565±0/0001	2/1905±0/0001	2
1/49	2/1578±0/0001	2/1905±0/0001	3
1/54	2/1567±0/0001	2/1905±0/0001	4
1/47	2/1582±0/0001	2/1905±0/0001	5
1/56	2/1563±0/0001	2/1905±0/0001	6
1/47	2/1567±0/0001	2/1905±0/0001	7
1/63	2/1547±0/0001	2/1905±0/0001	8
1/76	2/1519±0/0001	2/1905±0/0001	9

جدول9- نتايج آزمون خوردگي نمونههاي مختلف.



شکل14- درصد کاهش وزن نمونههای اتصالیافته در دماها و زمانهای مختلف.

950 درجه سانتی گراد و زمان 90 دقیقه به مقدار حدود 10/5 مگاپاسکال و بیشترین استحکام برشی، مربوط به نمونه اتصالیافته در دمای 1000 درجه سانتی گراد و زمان 150 دقیقه به مقدار حدود 47 مگایاسکال بود.

- نتایج آزمون میکروسختی نشان داد که در فصل مشترک مناطقی وجود دارد که میکروسختی آن مناطق، از فلزات پایه بسیار بیشتر است. این نقاط ترکیبات بینفلزی به وجود آمده هستند.

-در بررسی ریزساختار سطوح شکست می توان این نکته مهم را ذکر کرد که در دمای 950 درجه سانتی گراد، سطح شکست عاری از ترکیبات بینفلزی آهن و تیتانیوم بود. عمدتاً در دمای

950 درجه سانتی گراد، ترکیبات بینفلزی Ti_xCu_y دیده شد. درحالی که در دماهای 1000 و 1050 درجه سانتی گراد، سطح شکست حاوی ترکیب بینفلزی FeTi بود. -میزان خوردگی به شدت وابسته به ترکیبات بینفلزی تشکیل

شده است. نمونههایی که ترکیب بینفلزی کمتری داشتند، از خود مقاومت به خوردگی بیشتری نشان داداند. همچنین ترکیبات بینفلزی آهن-تیتانیوم مقاومت به خوردگی کمتری از ترکیبات بینفلزی مس-تیتانیوم داشتند.

منابع

[1] Gale W F, Butts D A., 2004, Transient Liquid Phase Bonding, Science and Technology of Welding & Bonding Join of TiNi Alloy and Stainless Steel in Hanks Solution, Advanced Materials Research Vols750, pp:739-742, 2013.

[11] Shuying Liu, Guangbao Liu, Zhonghao Heng, Kuan Xu, Research on Interface Structure and Fracture Mechanism of Diffusion Bonding of Titanium Alloy and Stainless Steel, Applied Mechanics and Materials Vols117-119, pp:380-384, 2012.

[12] Sheng GM, Huang JW, Qin B, Zhou B, Qiu SY, Li C, 2005 an Experimental Investigation of Phase Transformation Superplastic Diffusion Bonding of Titanium Alloy to Stainless Steel. J Mater Sci 40, 2005.

[13] Sam S., Kundu S., Chatterjee S., Diffusion Bonding of Titanium Alloy to Micro-Duplex Stainless Steel using a Copper Interlayer: Interface Microstructure and Strength Properties. Materials and Design. Vol. 40, pp. 237–244, 2012.

[14] Kajzer, W.; Krauze, A.; Walke, W.; Marciniak, J. Corrosion resistance of Cr-Ni-Mo steel in simulated body fluids. J. Achiev. Mater. Manuf. Eng., 18, 115-118, 2006.

[15] Ghosh M, Chatterjee S, Mishra B. The Effect of Intermetallics on the Strength Properties of Diffusion Bonds Formed Between Ti-5.5Al-2.4 V and 304 Stainless Steel, Materials Science Engineering, A363:268–74, 2003.

[16] Ghosh M, Chatterjee S., Diffusion Bonded Transition Joints of Titanium to Stainless Steel with Improved Properties. Materials Science Engineering, A358:152–8, 2003.

[17] Chang QA, Zang PJ. The Evolution of Microstructure and Diffusion Paths in the Titanium-Steel Explosion Weld Interface During Heat Treatment. J Less Common Materials, 162:315–22, 1990.

[18] Kazakov N. F., "Diffusion Bonding of Materials", Mirpublishers, Moscow, pp:25-49, 2005 Joining, 9: 283–300.

[2] Li J F, Agyakwa P A, Johnson C M., 2010, A Fxed-Grid Numerical Modelling of Transient Liquid Phase bonding and other Diffusion- Controlled Phase Changes, Journal of Materials Science, 45: 2340–2350.

[3] Padrona T, Khana T I, Kabirb M J., Modelling the Transient Liquid Phase Bonding Behaviour of a Duplex Stainless Steel using Copper Interlayers, Materials Science and Engineering A, 385: 220–228, 2004.

[4] He P, Zhang J, Zhou R, Li X., Diffusion Bonding Technology of a Titanium Alloy to a Stainless Steel Web with an Cu Interlayer. Materials Characterization, Vol.43, pp. 287–292, 1999.

[5] Shrivastava S., Medical Device Materials. Proceedings of the Materials & Processes for Medical Devices Conference. ASM International., 2004.

[6] Elrefaey A., Tillmann W., "Transient Liquid Phase Bonding of Titanium to Steel using a Copper Alloy as Interlayer", Journal of Materials Processing Technology 209, pp:2746-2752, 2007.

[7] Rahman A.H.M.E, Cavalli M.N., Strength and Microstructure of Bonded Titanium and 304 Stainless Steel by Transient Liquid Phase Bonding using Silver and Copper Interlayers, Materials Science and Engineering A527, pp:5189-5193, 2010.

[8] Jalali Ali, Atapour Masoud, Shamanian Morteza, Transient Liquid Phase Bonding of Ti-6Al-4V/UNS 32750 Super Duplex Stainless Steel, Journal of Manufacturing Processes 33, pp:194-202, 2018.

[9] Zakipour Shahrokh, Halvaee Ayoub, Samavatian Majid, an Investigation on Microstructure Evolution and Mechanical Properties During Transient Liquid Phase Bonding of Stainless Steel 316L to Ti–6Al–4V, Journal of Manufacturing Processes 49, pp:100-112, 2014.

[10] Yingling Wang, Qiuzhi Gao, Guifang Sun, Jie Ye, Corrosion Behavior of the Transient Liquid Phase