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)

چکیده

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 316L مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از فویل مس خالص با ضخامت 100 میکرومتر به عنوان لایه واسط استفاده شد و عملیات اتصال‌دهی در سه دمای 950، 1000 و 1050 درجه سانتی‌گراد و در سه زمان 90، 120 و 150 دقیقه انجام شد. پس از انجام عملیات اتصال‌دهی، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمون برش نشان داد استحکام برشی جوش در دمای اتصال 1000 درجه سانتی‌گراد از دماهای 950 و 1050 درجه سانتی‌گراد بهتر است. علت این امر، کمتر تشکیل‌شدن ترکیبات بین‌فلزی در این دما و هم‌چنین کم‌تربودن ناحیه انجماد غیرهمدما در این نمونه بود. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که در دمای 950 درجه سانتی‌گراد ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم و آهن تشکیل نشده است، درحالی‌که در دو دمای 1000 و 1050 درجه سانتی گراد، ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم و آهن به مقدار قابل توجهی وجود داشت. نتایج آزمون خوردگی نشان داد که مقاومت به خوردگی ناحیه جوش، وابسته به ترکیبات بین‌فلزی به وجود آمده در این ناحیه است. از جمله ترکیبات بین فلزی به وجود آمده در این اتصال می‌توان به $TiCu_2$، Ti_2Cu، TiCu و FeTi اشاره نمود. نمونه اتصال‌یافته در دمای 1000 درجه سانتی‌گراد و زمان 120 دقیقه به دلیل دارابودن حداقل ترکیبات بین‌فلزی، مقاومت به خوردگی بهتری از خود نشان داد. هم‌چنین فازهای بین‌فلزی آهن - تیتانیوم، مقاومت به خوردگی کمتری از فازهای بین‌فلزی مس - تیتانیوم نشان دادند.

کلمات کلیدی: فرآیند فاز مایع گذرا، اتصال فلزات غیر همجنس، فولاد 316L، تیتانیوم خالص تجاری.

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)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h-sabet@kiau.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

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 µm 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, Ti_2Cu, and $TiCu_2$. 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.

1- مقدمه

فرآیند اتصال فاز مایع گذرا فرآیندی است که در آن فلزات با استفاده از یک لایه واسط از جنس فلز پایه و یا مواد دیگر، اتصال می‌یابند. لایه واسط بین دو فلز مورد اتصال قرار داده می‌شود 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 ایجاد اتصال می‌شود. در این فرآیند پس از نفوذ کامل لایه واسط و همگن‌سازی می‌توان به استحکام حدود 90 درصد فلز پایه 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 تجهیزات خاص، دمای ذوب بالای مجدد محل اتصال (و درنتیجه افزایش دمای کاری قطعه) و پایین‌بودن میزان اعوجاج و عیوب جوشکاری، نسبت به سایر فرایندها برتری دارد. این فرآیند شامل چهار مرحله است: بستن قطعات روی هم با استفاده از نگهدارنده[1]، ذوب لایه واسط، انجماد به صورت همدما و همگن‌سازی. در مرحله اول قطعات با استفاده از یک نگهدارنده به طریقی بسته می‌شود که لایه واسط بین دو 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 می‌گیرد. درصورتی‌که نمونه اتصال یافته به مدت بیشتری درون کوره قرار بگیرد، غلظت لایه واسط در سراسر فلزات پایه یکنواخت‌تر می‌شود و خواص مکانیکی اتصال بسیار نزدیک به فلزات پایه می‌شود (تا حدود 90 درصد فلزات پایه) [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 TiC 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].

1-Fixture

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

از دیگر کاربردهای اتصال فولاد 316L به تیتانیوم خالص می‌توان به کاربردهای پزشکی این اتصال مانند مفاصل مصنوعی و ایمپلنت‌های استخوانی اشاره نمود. فولاد 316L و تیتانیوم 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 الاستیسیته کمتر نسبت به فولاد (که باعث عدم تمرکز تنش و پخش نیرو در استخوان می‌شود)، استفاده از تیتانیوم را ترغیب می‌کنند. لذا اتصال تیتانیوم به فولاد 316L اهمیت پیدا می‌کند.

در پژوهشی که توسط Tillmann و همکارش [6] انجام شد، از فلز مس خالص به عنوان لایه واسط برای اتصال فولاد ساده کربنی به فلز تیتانیوم خالص از روش اتصال فاز مایع گذرا استفاده شد. عملیات اتصال در دمای 850 درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان‌های 30، 60، 90 و 180 دقیقه انجام شد. هدف از این پژوهش بررسی اثر زمان فرآیند بر خواص مکانیکی اتصال در دمای 850 درجه سانتی‌گراد بود. نتایج تحقیق آنان نشان داد که اتصال مناسبی در دمای 850 درجه سانتی‌گراد در همه زمان‌های 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 اتصال‌دهی تا 90 دقیقه باعث افزایش استحکام شد. اما افزایش زمان اتصال‌دهی تا 180 دقیقه باعث کاهش استحکام شد. علت آن افزایش مقدار ناپیوستگی بود. پس از آزمون برش و شکست قطعات، در فصل مشترک ناحیه اتصال و تیتانیوم ترکیب بین فلزی Ti_2Cu 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 لایه واسط نقره، 980 و 1030 درجه سانتی‌گراد 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 سانتی‌گراد به مدت 10 ساعت بود. ایشان گزارش دادند که ریزساختار ناحیه اتصال به شدت وابسته به دما، زمان و نوع لایه واسط است. زمانی‌که لایه واسط نقره مورد استفاده قرار گرفت، در دمای 980 درجه سانتی‌گراد و زمان 10 ساعت، ترکیب بین‌فلزی AgTi در ناحیه اتصال دیده شد. با افزایش دما به 1030 درجه سانتی‌گراد و افزایش زمان به 30 ساعت، ترکیب بین‌فلزی $AgTi_2$ بیشتری مشاهده شد. زمانی که مس به عنوان لایه واسط استفاده شد، محلول جامد تیتانیوم و مس تشکیل 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 برشی 160 مگاپاسکال 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، 950و 980 درجه سانتی‌گراد و زمان 60 دقیقه برای انجام فرآیند درنظر گرفته شد. بررسی‌های ایشان نشان داد که اتصال سالم و بدون عیبی در دمای 930 درجه سانتیگراد و زمان 60 دقیقه به روش اتصال فاز مایع گذرا به دست می‌آید و هیچ‌گونه ناپیوستگی در منطقه اتصال ایجاد نمی‌شود. 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 تشکیل‌شده تشخیص داده شدند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

فازهای مشاهده‌شده عبارتند بودند از: TiCu، FeTi، $TiCu_3$، $FeTi_2$، Cr_2Ti و $Cu_{0.5}Fe_{0.5}Ti$. 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 316L به آلیاژ تیتانیوم Ti–6Al–4V 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 900 و 960 درجه سانتی‌گراد و زمان 60 دقیقه با لایه های واسط 25، 50 و 100 میکرومتر انجام شد. نتایج آنان نشان داد که ترکیبات مختلف بین‌فلزی 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 900 درجه سانتی‌گراد و زمان 60 دقیقه بود. افزایش دمای اتصال به 960 درجه سانتی‌گراد، باعث کاهش استحکام، به دلیل افزایش عرض ناحیه اتصال و ایجاد ترکیبات بین‌فلزی در سطح اتصال، شد.

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 سانتی‌گراد و زمان 60 دقیقه انجام 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: Ti_2Ni، Ti_3Ni_4، $TiCu_3$، TiNiCu و TiFe. تشکیل فاز TiNi باعث کاهش 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 فرآیند850، 900، 950 و 1000 درجه سانتی‌گراد 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 سانتی‌گراد و زمان آن 60 دقیقه بود. این مقدار حداکثر استحکام برشی برابر با 163 مگاپاسکال بود.

در تحقیق حاضر اثر پارامترهای دما و زمان عملیات اتصال فاز مایع گذرا، بر خواص مکانیکی، ریزساختار و مقاومت به خوردگی اتصال تیتانیوم خالص تجاری به فولاد 316L با حضور لایه واسط مس مورد بررسی قرار گرفته شد.

2- روش تحقیق

برای انجام فرآیند اتصال فاز مایع گذرا، ورقه هایی از جنس تیتانیوم خالص گرید 2 ساخت شرکت چینیJiangsu Hongbao فولاد 316L و فویل مسی تهیه شد. به منظور تطبیق ترکیب شیمیایی فولاد 316L و تیتانیوم گرید 2 و فویل مسی با ترکیب شیمیایی مورد نظر، نمونه‌ها مورد آزمون اسپکتروسکوپی نشر نوری[1] قرار گرفتند. ترکیب شیمیایی فولاد 316L 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 1 میلی‌متر، ورق تحت عملیات نورد قرار گرفت تا به ضخامت مورد 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

۱- Optical emission spectrometry

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

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.

جدول1- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فولادL316

C	Mn	Si	P	S
۰/۰۲۹	۱/۸۹۰	۰/٦۸۰	۰/۰٤٤	۰/۰۲۸
Cr	Mo	Ni	N	Fe
۱٦/۸۹۰	۲/۲۱۰	۱۳/۱۱۰	۲/۵۷۰	پایه

جدول2- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) تیتانیوم خالص تجاری

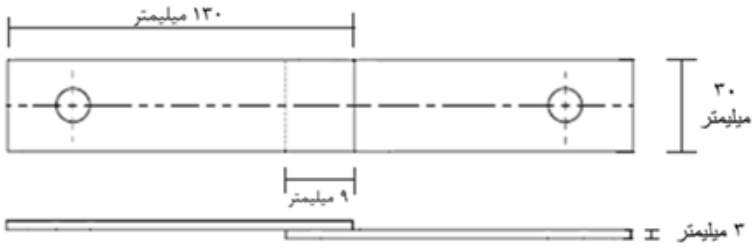
N	C	H	Fe	O	Ti
۰/۰۲۸	۰/۰۷۵	۰/۰۱٤	۰/۲۷۰	۰/۲۳۰	پایه

جدول3- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فویل مسی

Cu	O	Mn	Fe	Ni
۹۹/۸۰۰	۰/۰۷۵	۰/۰۱۷	۰/۰۱۵	۰/۰۳۰

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 سانتی‌گراد 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 سانتی‌گراد بر دقیقه بود. اتمسفر کوره نیز هوای آزاد انتخاب شد. علت انتخاب دماهای مذکور ناشی از تشکیل یوتکتیک فلز مس و تیتانیوم در دماهای 875 و 960 درجه سانتی‌گراد می‌باشد [11]. لذا دما کمی بالاتر از این دو دما انتخاب شد تا فاز مذاب تشکیل و سپس در اثر تغییر ترکیب (نفوذ)، منجمد شود. همچنین علت انتخاب 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



شکل1- ابعاد قطعه برای انجام جوشکاری طبق استاندارد AWS C3.

جدول4- نحوه شماره گذاری نمونه‌ها برای انجام فرآیند فاز مایع گذرا.

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

نمونه درنظر گرفته‌شده، نمونه‌ای 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]:

$$\text{استحکام برشی} = \frac{\text{حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه}}{\text{سطح مقطع}} \quad (1)$$

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام متالوگرافی، از استاندارد ASTM E3 استفاده شد. برای انجام بررسی ریزساختار اتصال، نمونه‌ها از محل روی‌هم 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، 800، 1000، 1500، 2000، 2500 و3000) و سپس پولیش (با 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 دقیق‌تر فازهای حاصل در محل اتصال از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل SEM SERON TECH Ais2300c استفاده شد. از مود تصویربرداری الکترون ثانویه[1] و ولتاژ کاری 30 kV استفاده شد. همچنین آنالیز نقطه‌ای[2]، آنالیز خطی[3] و نقشه عناصر آلیاژی[4] از نمونه‌های منتخب تهیه شد. همچنین جهت بررسی ضخامت فصل مشترک، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد که ضخامت فصل مشترک را بر حسب میکرومتر گزارش نمود.

به منظور شناسایی ترکیبات بین فلزی به وجود آمده، نمونه‌ها مورد آزمون پراش پرتو ایکس[5] قرار گرفتند. دستگاه XRD مورد استفاده PHILIPS-D6792 ساخت هلند بود که از کاتد مسی جهت آزمون استفاده شد و با اندازه گام[6] 0/05 درجه آزمون انجام گرفت.

آزمون میکروسختی مطابق استاندارد ASTM E384 انجام گردید. دستگاه مورد استفاده برای آزمون میکروسختی، BOHLER-ILLINOIS 60044 بود که قابلیت اندازه‌گیری سختی 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 بدن[7] که یک محلول با غلظت یون‌های نزدیک به پلاسمای خون انسان است و در شرایط خفیف pH و دمای فیزیولوژیکی یکسان نگهداری می‌شود استفاده شد. جدول (6) غلظت یون‌های مایع شبیه‌سازی‌شده بدن و پلاسمای خون انسان را ارائه می‌دهد.

جدول5- ترکیب شیمیایی محلول اچ مورد استفاده

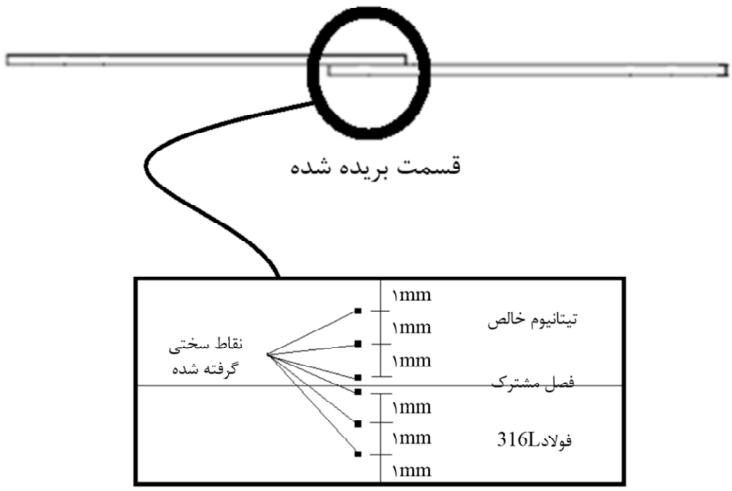
نوع ماده مصرفی	HF	HNo_3	HCl
مقدار ماده مصرفی	5 میلی‌لیتر	15 میلی‌لیتر	10 میلی‌لیتر

آزمون خوردگی در محیط شبیه‌سازی شده بدن[8]، مطابق استاندارد ASTM G5 مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور قطعات از ناحیه اتصال به صورت عرضی برش خورد (شکل (3)) و پس از علامت‌گذاری، همگی درون یک بشر که حاوی 100 میلی لیتر محلول شبیه‌سازی‌شده 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 سانتی‌گراد (دمای بدن) نگه داشت.

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

1-Secondary electron
2 -Spot analysis
3 -Line scan
4 -Mapping alloy
۵ -X-Ray diffraction
۶ -Step size
۷ -Simulation body fluid
8 -Simulated body fluid

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]



شکل2- طرح‌واره‌ای از نقاط میکروسختی گرفته شده.

جدول 6- غلظت یون‌های مایع شبیه‌سازی‌شده بدن و پلاسمای خون انسان.

یون	غلظت $(mmol/dm^3)$	
	محلول شبیه سازی شده بدن	پلاسمای خون انسان
Na^+	142	142
K^+	5	5
Mg^{2+}	1/5	1/5
Ca^{2+}	2/5	2/5
Cl^-	147/8	103
HCo_3^-	4/2	27
HPo_4^{2-}	1	1
So_4^{2-}	0/5	0/5

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

$$\text{درصد کاهش وزن نمونه} = \frac{\text{وزن ثانویه} - \text{وزن اولیه}}{\text{وزن اولیه}} \times 100 \quad (2)$$

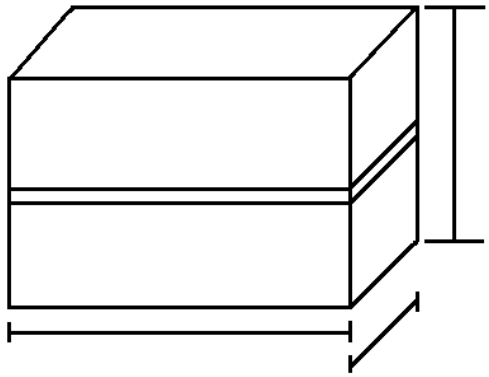
3- بحث و بررسی

نتایج آزمایش‌های برش برای قطعات جوش‌داده‌شده در دماها و زمان های مختلف در جدول (7) قابل مشاهده است. بررسی جدول (7) مشخص می‌کند که بیشترین استحکام برشی، مربوط به نمونه اتصال یافته در دمای 1000 درجه سانتی‌گراد و زمان 150 دقیقه به مقدار حدود 47 مگاپاسکال است. علت بالابودن استحکام برشی این نمونه و سایر نمونه‌های اتصال‌یافته در دمای 1000 درجه سانتی‌گراد، 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 می‌دهد.

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

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 پهن‌تر 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 می‌شود که احتمالا ترکیبات بین‌فلزی تیتانیوم-مس است. میزان این لایه با افزایش زمان افزایش خواهد یافت. وجود ساختارهای یوتکتیکی در نمونه شماره 1 به معنای عدم کامل‌بودن انجماد است [16]. در این نمونه ساختار از نواحی انجماد غیرهمدما[1]، انجماد همدما[2] و ناحیه متاثر از نفوذ[3] 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 مکانیکی تاثیر منفی دارد [17]. شکل (6) سطح شکست 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 Ti_2Cu را نشان می‌دهد که 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.

جدول7- نتایج آزمون برش برای نمونه‌های اتصال‌یافته در دماها و زمان‌های مختلف.

شماره نمونه	حداکثر نیروی تحمل شده (نیوتن)	استحکام برشی (مگاپاسکال)
1	2850±10	10/55±0/03
2	3400±10	12/59±0/03
3	8900±10	32/96±0/03
4	11500±10	42/59±0/03
5	12500±10	46/29±0/03
6	12700±10	47/03±0/03
7	9600±10	35/55±0/03
8	9000±10	33/33±0/03
9	7300±10	27/03±0/03

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 می‌دهد.

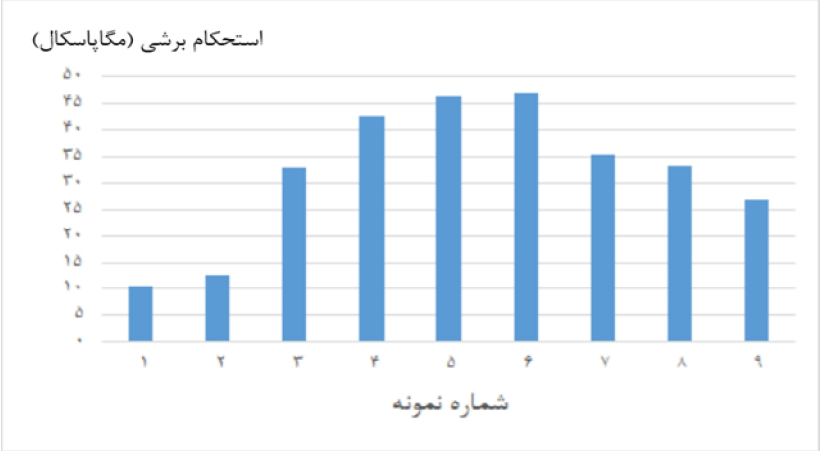
همان‌گونه که از شکل (7) مشخص است، مس در محدوده اتصال متراکم بوده است. به عبارت دیگر نفوذ مس به فلزات پایه بسیار کم بوده است. علت کم‌بودن نفوذ، دما و زمان کم است. شکل (8) نقشه توزیع عناصر برای نمونه شماره 1 را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نمایان است، نفوذ عناصر

1 -Athermally solidified zone

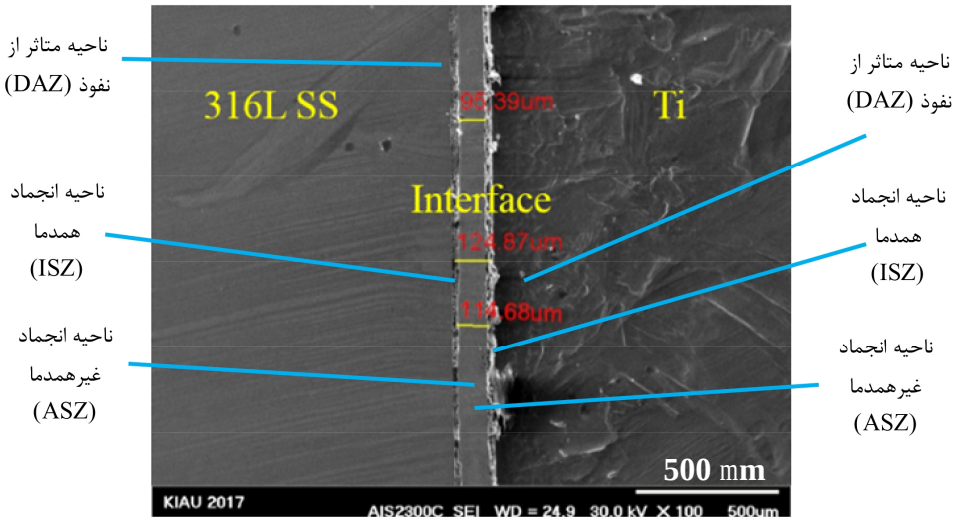
2 -Isothermally solidified zone

3 -Diffusion affected zone

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]



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

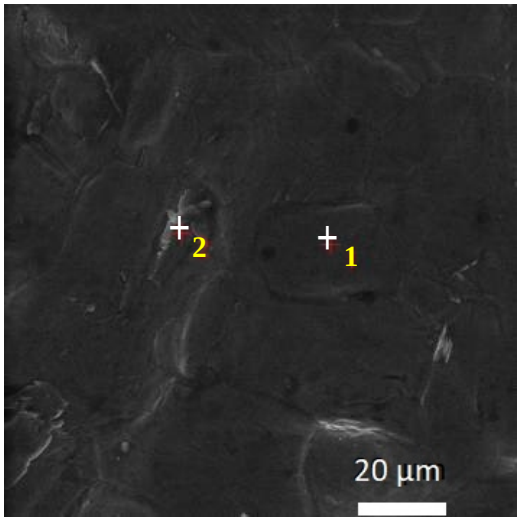


شکل 5- ریزساختار اتصال ایجادشده نمونه شماره 1.

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 [18] 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 وسیع‌تر شده است [17]. افزایش دما و زمان نگهداری باعث افزایش میزان نفوذ می‌شود 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 می‌دهد در جدول (8) نیز آنالیز نقطه‌ای نمونه مذکور ارائه شده است.

نتایج جدول (8) مشخص می‌کند، در نقطه شماره 3، درصد اتمی کروم 18 و درصد اتمی تیتانیوم 19 و درصد اتمی آهن 55 است. بنابراین نقطه شماره 3 آنالیز محلول جامدی از آهن را نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی تیتانیوم و کروم در آن حل شده است. با توجه به بالابودن مقدار آهن در سطح شکست این نمونه و از طرفی با توجه به عدم نفوذ عنصر آهن در فصل مشترک (در آنالیز خطی و نقشه توزیع عناصر)، می‌توان این

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]



شکل 6- سطح شکست نمونه شماره 1.

جدول8- آنالیز شیمیایی سطح شکست نمونه‌ها.

نقطه آنالیز گرفته شده	درصد	عنصر آلیاژی				
		Cu	Ni	Fe	Cr	Ti
نقطه 1 (نمونه شماره1)	درصد اتمی	35/408	0/809	0/427	0/441	62/916
	درصد وزنی	41/995	0/886	0/445	0/428	56/247
نقطه 2 نمونه شماره1)	درصد اتمی	51/760	0/752	1/058	0/409	46/021
	درصد وزنی	58/546	0/786	1/051	0/379	39/238
نقطه 3 (نمونه شماره 6)	درصد اتمی	0/923	4/929	55/949	18/469	19/731
	درصد وزنی	1/090	5/381	58/099	17/856	17/574
نقطه 4 (نمونه شماره 6)	درصد اتمی	18/332	8/646	22/431	1/800	48/792
	درصد وزنی	21/750	9/478	23/389	1/747	43/636
نقطه 5 (نمونه شماره 6)	درصد اتمی	2/517	3/815	71/302	9/812	12/554
	درصد وزنی	2/921	4/089	72/698	9/314	10/978

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 نقطـه شمـاره 5، درصد اتمی 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 می‌دهد.

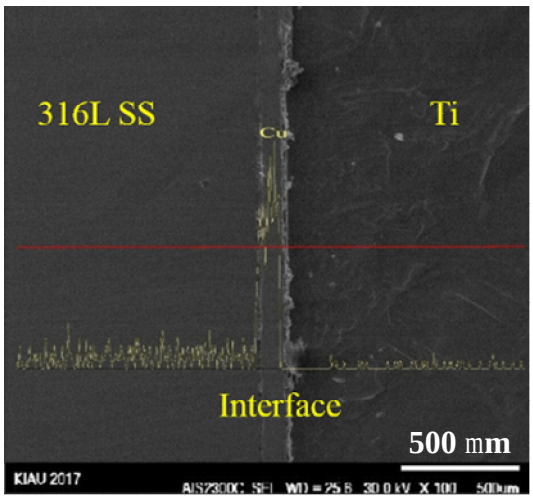
همان‌گونه که از شکل (12) مشخص است، مس در فولاد به خوبی نفوذ کرده است. نفوذ مس در فلز تیتانیوم بسیار ناچیز می‌باشد. همچنین فلز تیتانیوم به خوبی در فصل مشترک نفوذ کرده است. از طرفی عنصر آهن در فصل مشترک خیلی کم نفوذ کرده است. نفوذ تیتانیوم در فصل مشترک بسیار زیاد است

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

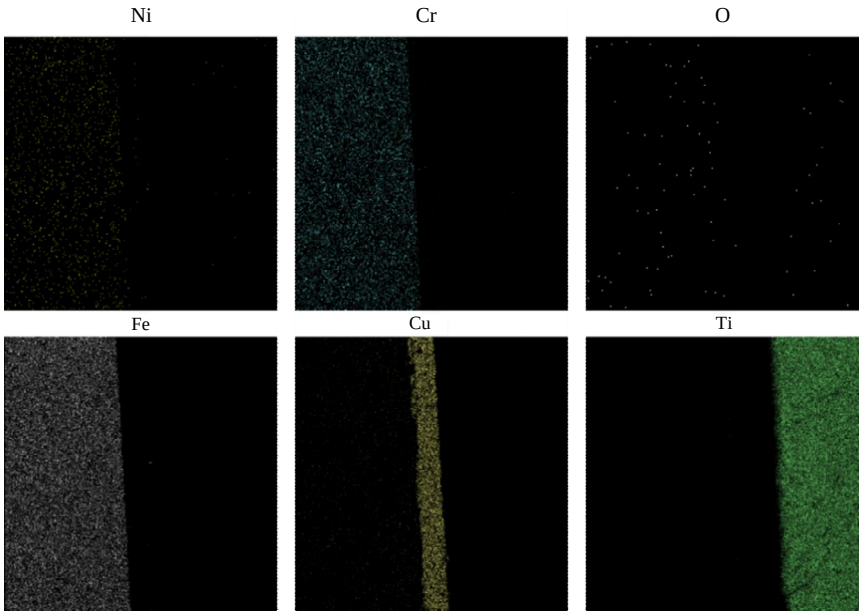
و این به دلیل بالابودن ضریب نفوذ تیتانیوم در مس هست [8]. شکل (13) نقشه توزیع عناصر برای نمونه شماره 6 را نشان می‌دهد.

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 سطح شکست دیده شده‌اند. نفـــوذ مـس در آهن و تیتـانیوم در مس به مقـدار زیادی دیده می‌شود.

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 می‌یابد که سبب افزایش خواص مکانیکی شده است. در نمونه های اتصال‌یافته در دمای 1050 درجـه سـانتـی گـراد با افزایش زمان اتصال‌دهی، به دلیـل نفوذ

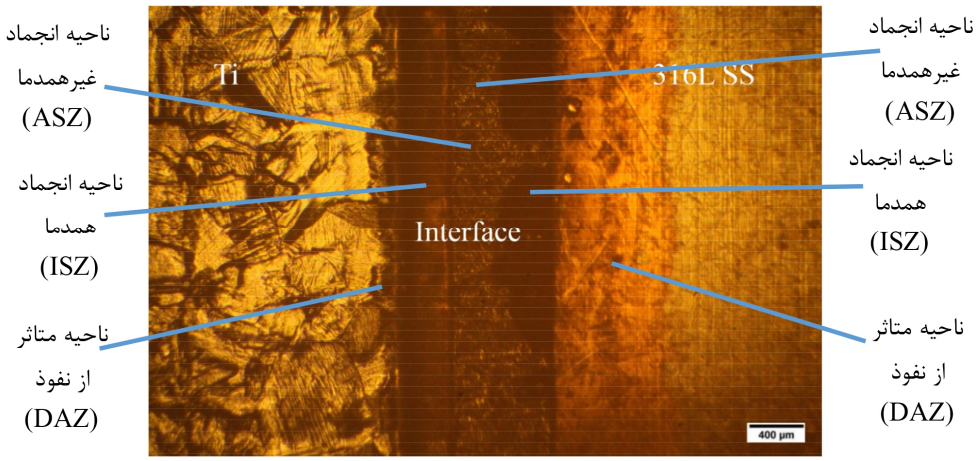


شکل7- آنالیز خطی مس در نمونه اتصال یافته شماره 1.

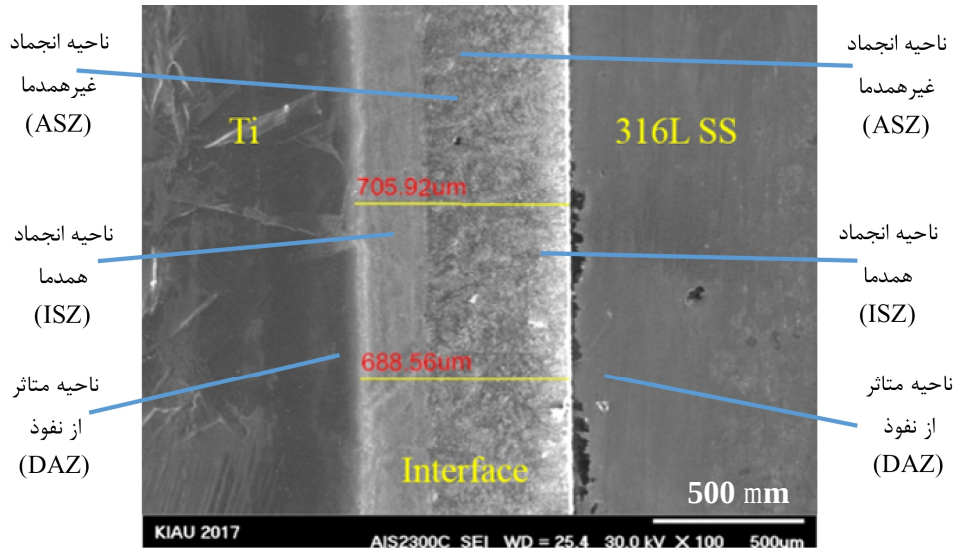


شکل 8- نقشه توزیع عناصر برای نمونه شماره 1.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]



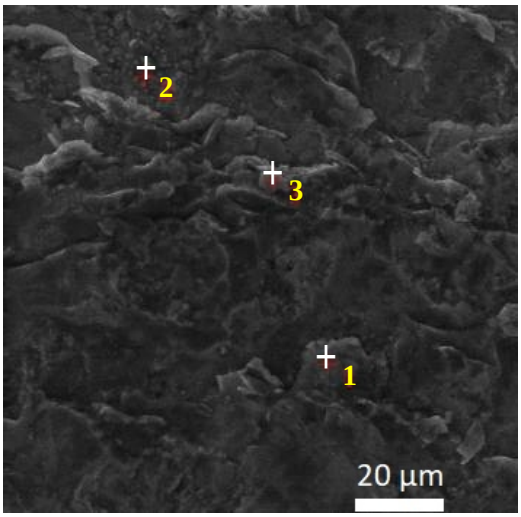
شکل9- تصویر میکروسکوپی نوری اتصال ایجادشده در نمونه شماره 6.



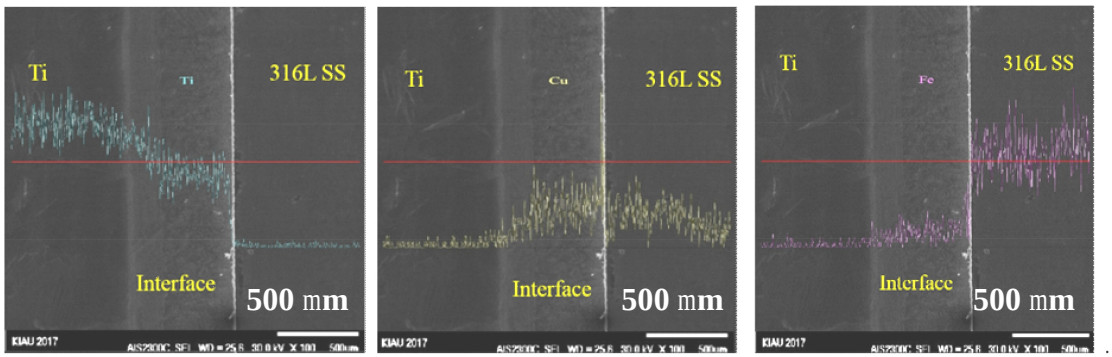
شکل10- ریزساختار اتصال ایجادشده در نمونه شماره 6.

تیتانیوم به فولاد، ترکیبات بین‌فلزی FeTi زیادی تشکیل شده است که باعث افت خواص مکانیکی می‌شود. جدول (9) نتایج آزمون خوردگی نمونه‌های مختلف را در محلول شبیه‌سازی‌شده بدن نشان می‌دهد. شکل (14) به منظور مقایسه میزان کاهش وزن نمونه‌های مختلف است. همان‌گونه که در شکل (14) دیده می‌شود، نمونه‌های اتصال‌یافته در دمای 950 درجه سانتی‌گراد، با افزایش زمان اتصال (نگهداری در کوره)، مقاومت به خوردگی بهتری پیدا می‌کنند. علت این امر، به وجود آمدن محلول جامد بیشتر با گذشت زمان است که مقاومت به خوردگی خوبی دارد. نمونه‌های اتصال‌یافته در دمای 1000 درجه سانتی‌گراد، از روند خاصی پیروی نمی‌کند و نمونه نگهداشته‌شده 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 بین‌فلزی آهن و تیتانیوم می‌شود که مقاومت به خوردگی ضعیفی دارند و بنابراین مقاومت به خوردگی کاهش پیدا کرده است. نمونه‌های اتصال‌یافته در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد، با افزایش زمان اتصال با کاهش مقاومت به خوردگی مواجه

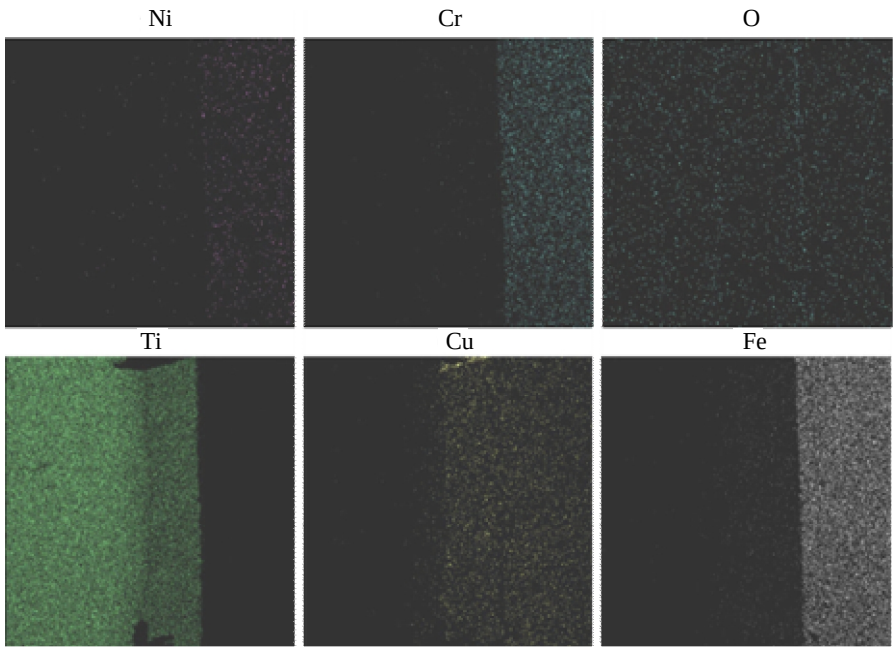
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]



شکل11- سطح شکست نمونه شماره 6.



شکل12- آنالیز خطی تیتانیوم، مس و آهن در نمونه اتصال‌یافته شماره 6.



شکل 13- نقشه توزیع عناصر برای نمونه شماره 6.

4- نتیجه‌گیری

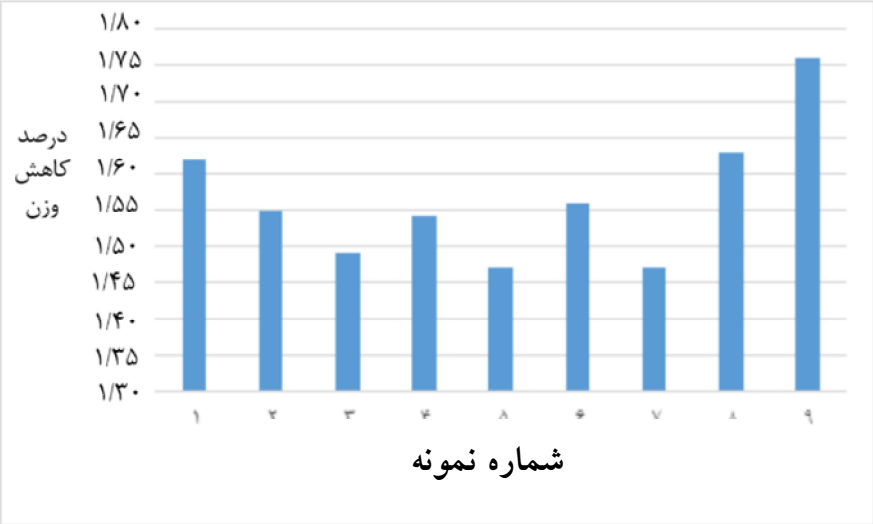
-کمترین استحکام برشی مربوط به نمونه اتصال یافته در دمای

شده‌اند. علت این امر به وجود آمدن فازهای بین‌فلزی آهن و تیتانیوم مثل FeTi است که مقاومت به خوردگی کمی دارند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

جدول9- نتایج آزمون خوردگی نمونه‌های مختلف.

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



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

950 درجه سانتی‌گراد و زمان 90 دقیقه به مقدار حدود 10/5 مگاپاسکال و بیشترین استحکام برشی، مربوط به نمونه اتصال‌یافته در دمای 1000 درجه سانتی‌گراد و زمان 150 دقیقه به مقدار حدود 47 مگاپاسکال 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 می‌توان این نکته مهم را ذکر کرد که در دمای 950 درجه سانتی‌گراد، سطح شکست عاری از ترکیبات بین‌فلزی آهن و تیتانیوم بود. عمدتاً در دمای 950 درجه سانتی‌گراد، ترکیبات بین‌فلزی Ti_xCu_y دیده شد. درحالی‌که در دماهای 1000 و 1050 درجه سانتی‌گراد، 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 دادند. 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 &

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]