E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 10, Number 2, 2025



Effect of time on transient liquid phase bonding of electron beam melted Ti6242 titanium alloy to AISI 316L stainless steel

M. K. Vojdanpak, B. Niroumand*, M. Shamanian
Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran.

Received 30 October 2024 ; Accepted 18 December 2024

Abstract

Despite rapid advancement of additive manufacturing methods in recent years, sufficient research on bonding of additively manufactured materials to conventional alloys has not been conducted. This study evaluates the bonding between austenitic stainless steel L316 and Ti-6242 alloy, fabricated by electron beam melting, using the transient liquid phase (TLP) bonding method. The TLP bonding was achieved using a copper interlayer and processing in a vacuum furnace, examining the effects of process time and surface roughness on bond quality. The samples were characterized by optical and scanning electron microscopy, X-ray diffraction, shear strength testing, and surface roughness measurement. Results showed that reducing the surface roughness increased the shear strength. Additionally, processing time significantly affected the element diffusion, formation of intermetallic compounds like FeTi and TiCu, and the shear strength of the joints. The highest shear strength of 200 MPa was obtained with surface preparation by grinding and polishing and bonding at 980°C for 120 minutes.

Keywords: Additive manufacturing, Transient Liquid Phase bonding, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 316 Stainless steel, Bonding Time, Roughness.

*Corresponding Author B. Niroumand, behzn@cc.iut.ac.ir

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.06]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دهم، شماره2، پاییز و زمستان 1403

تاثیر زمان بر اتصال فاز مایع گذرای آلیاژ تیتانیوم Ti-6242 تولید شده به روش ذوب پرتوی الکترونی به فولاد زنگ‌نزن AISI 316L

محمد کیان وجدان پاک، بهزاد نیرومند *، مرتضی شمعانیان

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان 84156-83111، ایران.

دریافت مقاله: 1403/08/09 ؛ پذیرش مقاله: 1403/09/28

چکیده

روش‌های ساخت افزودنی شاهد پیشرفت‌های زیادی در سال‌های اخیر بوده است ولی پژوهش کافی برای اتصال این قطعات با آلیاژهای مرسوم انجام نشده است. مطالعه حاضر برای ارزیابی اتصال بین فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L و آلیاژ Ti-6242 ساخته شده به روش ذوب پرتوی الکترونی، با استفاده از روش فاز مایع گذرا، انجام شد. اتصال فاز مایع گذرا با استفاده از لایه میانی مس و فراوری در کوره خلاء انجام، و تاثیر زمان فرایند و زبری سطح بر کیفیت اتصال بررسی شد. برای مشخصه‌یابی نمونه‌ها از بررسی‌های ریزساختار نوری و الکترونی روبشی، پراش اشعه ایکس، استحکام برشی و زبری‌سنجی استفاده شد. نتایج نشان داد که با کاهش زبری سطح، استحکام برشی افزایش می‌یابد. همچنین مدت زمان فرایند، تأثیر قابل‌توجهی بر نفوذ عناصر، تشکیل ترکیبات بین‌فلزی مانند FeTi و TiCu و استحکام برشی اتصالات داشت. بالاترین استحکام برشی اتصال برابر با 200 مگاپاسکال و در شرایط آماده‌سازی سطح سنباده‌زنی و پولیش شده و اتصال در دما و زمان 980 درجه سانتی‌گراد و 120 دقیقه به دست آمد.

کلمات کلیدی: ساخت افزودنی، اتصال فاز مایع گذرا، آلیاژ تیتانیوم 6242، فولاد زنگ نزن 316، زمان اتصال، زبری سطح.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: بهزاد نیرومند، behzn@cc.iut.ac.ir

1- مقدمه

جوشکاری فلزات غیرمشابه در سال‌های اخیر به دلیل بهبود عملکرد، طراحی و کاهش هزینه‌ها مورد توجه قرار گرفته و در صنایع مختلف استفاده می‌شود. با این حال، اتصال دو آلیاژ با ضرایب انبساط حرارتی و دماهای ذوب متفاوت چالش‌برانگیز است و می‌تواند به ایجاد ریزساختارهای پیچیده و کاهش استحکام و مقاومت به خوردگی در منطقه جوش منجر شود [1]. تیتانیوم فلزی با ویژگی‌هایی مانند مقاومت مکانیکی بالا، چگالی کم، غیرسمی بودن و مقاومت عالی در برابر خوردگی است که می‌تواند در دماهای مختلف، از پایین‌ترین تا حدود 600 درجه سانتی‌گراد، پایدار بماند [2]. تیتانیوم به‌سرعت در تماس با اکسیژن لایه اکسیدی پایداری تشکیل می‌دهد که آن را در برابر خوردگی مقاوم می‌سازد [3]. این فلزدردمای‌اتاق دارای ساختار بلوری HCP (فاز آلفا) است و در دمای حدود 885 درجه سانتی‌گراد به ساختار BCC (فاز بتا) تبدیل می‌شود [4]. این دما با افزودن عناصر آلیاژی مانند آلومینیوم و مولیبدن تغییر می‌کند. براساس میزان فازهای آلفا و بتا، آلیاژهای تیتانیوم به 5دسته، آلفا، بتا، شبه آلفا، شبه بتا و آلفا-بتا، تقسیم می‌شوند

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.06]

[3].

خواص ویژه تیتانیوم و آلیاژهای آن، موجب کاربرد گسترده در صنایع فضایی، نفت و گاز، خودروسازی، دریایی و پزشکی شده است [5]. آلیاژ Ti-6Al-4V پرکاربردترین آلیاژ تیتانیوم است، زیرا استحکام کششی بالا، مقاومت به خوردگی و چگالی کم را با قابلیت تولید و کارپذیری خوب ترکیب می‌کند [6]. آلیاژ Ti-6242 برای کاربردهای دمای بالا در صنایع هوایی و توربین‌ها تا 500 درجه سانتی‌گراد استفاده می‌شود. دمای استحاله بتا (حدود 995 درجه سانتی‌گراد) در طراحی عملیات حرارتی این آلیاژ اهمیت زیادی دارد و تحت تأثیر ترکیب شیمیایی آن است [7].

فولادهای زنگ‌نزن شامل آستنیتی، فریتی و مارتنزیتی با حداقل ۱۰/5 درصد کروم هستند و به‌دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی و خواص مکانیکی مناسب، در صنایعی مانند ساختمان‌سازی، حمل‌ونقل، پتروشیمی، پزشکی و صنایع غذایی به‌کار می‌روند [8]. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، جوش‌پذیری بهتر، و افزایش استحکام با کار سرد، نسبت به سایر گروه‌های فولاد برتری دارند [9]. از بین این فولادها، فولاد 316 کم‌کربن، به‌دلیل خواص زیستی عالی، بیشترین کاربرد را در حوزه‌های پزشکی و بیومتریال دارد [10].

اتصال غیرمشابه فولادهای زنگ‌نزن و آلیاژهای تیتانیوم در صنایعی مانند سکوی نفتی و جوشکاری تیغه‌های موتور هواپیما استفاده می‌شود. همچنین کوپلینگ‌های تیتانیوم-فولاد در ایمپلنت‌های دندانی و مفاصل جذاب هستند [11]. روش‌های جوشکاری ذوبی به دلیل تشکیل ساختارهای شکننده در محل جوش برای اتصال این آلیاژها توصیه نمی‌شود و از روش‌های غیرذوبی مانند جوشکاری اصطکاکی و نفوذی استفاده می‌شود [1]. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیبات شکننده آهن-تیتانیوم در منطقه اتصال باعث کاهش چقرمگی اتصال می‌شود و روش اتصال فاز مایع گذرا می‌تواند این مشکل را بهبود بخشد [1].

اتصال فاز مایع گذرا (TLP) فرایندی است که برای اتصال مواد مشابه و غیرمشابه استفاده می‌شود. در این روش، یک لایه واسط با دمای ذوب مشخص بین دو قطعه قرار می‌گیرد و سپس در دمایی پایین‌تر از دمای ذوب لایه واسط، حرارت داده می‌شود. با ذوب لایه واسط و نفوذ عناصر آلیاژی بین مذاب و فلزپایه، ترکیب شیمیایی تغییر کرده و دمای انجماد مذاب افزایش می‌یابد. این فرایند باعث می‌شود خواص منطقه اتصال به فلزپایه نزدیک شود. پارامترهای اصلی تاثیرگذار بر خواص اتصال شامل دما، زمان، نوع و ضخامت لایه واسط است [12].

در فرایند اتصال فاز مایع گذرا، دما نقش مهمی در تشکیل و کنترل فاز مذاب و نفوذ عناصر دارد. انتخاب دمای مناسب برای انجماد هم‌دما و همگن‌سازی ضروری است. انتخاب نامناسب دمای فرایند، از یک طرف می‌تواند منجر به تشکیل ترکیبات بین‌فلزی و کاهش سرعت فرایند شود [13]. همچنین در صورت باقی‌ماندن مذاب تبدیل نشده در ناحیه اتصال، با تبدیل این مذاب در مرحله سرد شدن به ساختارهای یوتکتیکی، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از این مسئله، فرایند باید در دمای پایین‌تر انجام شود که زمان و هزینه را افزایش می‌دهد [14]. در صورتی‌که اتصال پیش از تکمیل انجماد همدما سرد شود، در خط مرکزی ناحیه‌ای تشکیل می‌شود که به‌صورت غیرهمدما منجمد شده است. در دو طرف این ناحیه، منطقه‌ای دیده می‌شود که به‌صورت همدما منجمد شده است. در پایان، در اثر نفوذ عناصر لایه واسط به فلزپایه، در فلزپایه در نواحی نزدیک فصل مشترک اتصال، منطقه‌ای تشکیل می‌شود که از عناصر لایه واسط غنی‌تر بوده و ترکیب شیمیایی آن با ترکیب شیمیایی اولیه فلزپایه متفاوت است. این منطقه به منطقه متأثر از نفوذ معروف است.

اخیرا فرایندهای ساخت افزودنی مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. روش‌های سنتی تولید قطعات فلزی مانند ریخته‌گری، متالورژی پودر، شکل‌دهی، جوشکاری و ماشین‌کاری دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند، اما سرعت تولید پایین و محدودیت‌های شکل‌دهی از مشکلات آن‌هاست [15]. در مقابل، فرایندهای ساخت افزودنی امکان تولید قطعات نزدیک به شکل نهایی، طراحی سبک‌وزن و سفارشی‌سازی را با سرعت بالاتر برای تولید محدود فراهم می‌کنند [16]. از مهم‌ترین روش‌های ساخت افزودنی، می‌توان به ذوب انتخابی با

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.06]

لیزر (SLM) و ذوب با پرتو الکترونی (EBM) اشاره کرد. روش ذوب با پرتوی الکترونی یک فناوری ساخت افزودنی برای قطعات فلزی است که توسط شرکت آرکام در سال 2002 معرفی شد. در این روش، به‌جای پرتوی لیزر از پرتو الکترونی برای ذوب پودر فلز استفاده می‌شود [17]. الکترون‌ها از یک رشته تنگستن در خلاء استخراج شده و به پودر فلزی هدایت می‌شوند، و ماده اولیه به‌صورت لایه‌لایه ذوب و شکل نهایی را تشکیل می‌دهد. این روش نسبت به ذوب لیزر سریع‌تر و گران‌تر است و سرعت سرد شدن کمتری دارد که باعث تفاوت در ریزساختار برخی مواد، مانند آلیاژهای تیتانیوم، می‌شود [18]. همچنین، این فرایند فقط برای مواد رسانا قابل استفاده است و برای مواد پلیمری یا سرامیکی مناسب نیست [19]. کاربردهای اصلی این روش در ایمپلنت‌های پزشکی و صنعت هوافضا است [20].

در پژوهش کوک و همکاران [21]، اتصال فاز مایع گذرا بین فولاد زنگ نزن 304 و آلیاژTi-6Al-4V با لایه واسط فویل آمورف مس به ضخامت 25 میکرومتر در دمای 900 درجه سانتی‌گراد انجام شد. مشاهده شد که اتصال شامل سه ناحیه فلزات پایه، ناحیه متاثر از نفوذ، و ناحیه اتصال با برهم‌کنش عناصر مس، تیتانیوم و آهن است. آنالیز EDS نشان داد که فازهای تیتانیوم آلفا-بتا، TiCu4، TiCu2، و فازهای بین‌فلزی FeTiو FeTi2 در ناحیه اتصال تشکیل می‌شوند. بیشترین سختی به‌دلیل تشکیل فازهای ترد در نزدیکی فولاد زنگ نزن 304 رخ داده و استحکام برشی 195 مگاپاسکال به‌دست آمد. با افزایش زمان نگهداری تا 60 دقیقه، عرض ناحیه نفوذ افزایش یافته و ناحیه اتصال ضخیم‌تر شد. در زمان 15 دقیقه، سختی ناحیه اتصال 321 ویکرز به‌دست آمد که ناشی از تشکیل فازهای Ti_2Cu و Ti_2Cu_3 است. با افزایش زمان به 30 و 45 دقیقه، سختی کاهش یافته و در نهایت در 60 دقیقه ناحیه اتصال از بین رفت. استحکام برشی در زمان 15 دقیقه 152 مگاپاسکال است و با افزایش زمان اتصال تا 30 دقیقه، به‌دلیل پخش شدن فاز مایع یوتکتیک، استحکام برشی افزایش می‌یابد [21]. اخیرا قربانی و همکاران [22] اتصال غیرمشابه بین آلیاژ Ti-6Al-4V تولید شده به‌روش EBM و نمونه تولید شده به‌روش سنتی را با استفاده از فرایند فاز مایع گذرا و لایه میانی مس خالص انجام داده و تاثیر دمای اتصال فاز مایع گذرا بر ریزساختار و خواص مکانیکی را بررسی کردند. این مقاله به عنوان اولین اتصال فاز مایع گذرا بر روی نمونه‌های ساخت افزودنی گزارش شده است. نتایج این پژوهشگران نشان می‌دهدکه با اتصال در دمای 970 درجه سانتی‌گراد و زمان 60 دقیقه، در اثر کامل شدن انجماد همدما، بالاترین استحکام برشی به‌دست آمده و هم‌چنین ترکیبات یوتکتیک در مرکز اتصال مشاهده نشده است [22].

با توجه به توسعه آلیاژهای تولید شده به روش ساخت افزودنی و محدودیت اندازه نمونه‌ها، اتصال این مواد به دیگر مواد اهمیت زیادی پیدا کرده است. پژوهش حاضر به بررسی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن 316 و آلیاژ Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti-6242)، تولید شده با روش ذوب پرتو الکترونی، از طریق فرایند فاز مایع گذرا، می‌پردازد. پیش از این، تحقیقاتی زیادی در زمینه اتصال این دو آلیاژ با این روش انجام نشده و به‌ویژه در مورد نمونه‌های تولید شده با ساخت افزودنی نیز مطالعه‌ای صورت نگرفته است. در این پژوهش تأثیر زمان بر اتصال این آلیاژها بررسی و شرایط مناسب اتصال انتخاب می‌شود.

2- مواد و روش پژوهش

در این تحقیق از نمونه‌های ساخت افزایشی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti-6242) مکعبی و ورق فولاد زنگ نزن آستنیتی 316 به ضخامت 5 میلی‌متر به عنوان فلزات پایه در اتصال نهایی استفاده شد. به‌منظور بررسی ترکیب شیمیایی فلزات پایه و عدم خطا در آنالیزهای پیش‌رو، هر دو ورق به‌کمک آزمون آنالیز عنصری مورد آزمایش قرار گرفتند. لایه واسط استفاده شده در این پژوهش فویل مس 99/9 درصد به ضخامت 25 میکرومتر است. از دلایل انتخاب این لایه میانی می‌توان به در دسترس بودن و قیمت کمتر آن نسبت به دیگر لایه واسط‌های رایج اشاره کرد. گذشته از این موارد طبق دیاگرام دوتایی Ti-Cu، مس و تیتانیوم در دمای 890 و

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

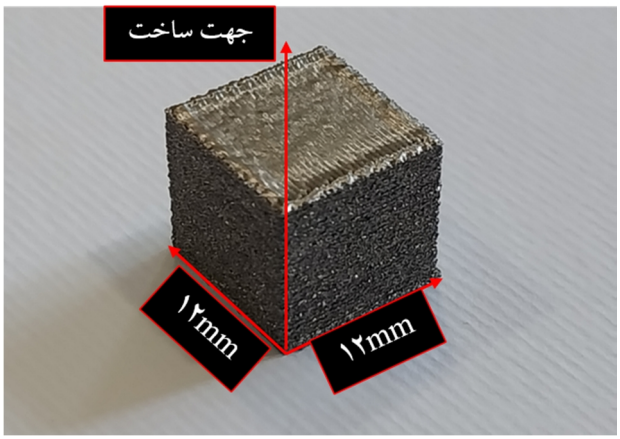
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.06]

970 درجه سانتی‌گراد تشکیل یوتکتیک می‌دهند [22].

در این پژوهش از قطعات مکعبی با طول ضلع 12 میلی‌متر از جنس آلیاژ تیتانیوم شبه آلفا Ti-6242 ساخت افزودنی شده به روش ذوب پرتو الکترونی استفاده شد. نمونه EBM با استفاده از دستگاه A2X-EBM9 ساخت شرکت ARCAM و پارامترهای بهینه شده در این شرکت شامل سرعت روبش پرتو الکترونی 11000 میلی‌متر بر ثانیه، جریان پرتو الکترونی 32 میلی‌آمپر و دمای پیش‌گرم محفظه در حدود 700 درجه سانتی‌گراد ساخته شد. تصویری از یک نمونه ساخته شده در شکل(1) نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی استاندارد [2] و اندازه‌گیری شده آلیاژ در جدول(1) ارائه شده است. همچنین قطر میانگین پودر مورد استفاده برای فرایند EBM در حدود 32 میکرومتر اندازه‌گیری شد.

جدول1- پارامترهای متغیر اتصال فاز مایع گذرای Ti-Ti6242/Cu/Stainless Steel 316L در فشار 1 مگاپاسکال، نرخ گرمایش 10 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و میزان خلا 10^{-5}.

ردیف	دما (°C)	زمان (min)
۹۸۰-۹۰	۹۸۰	۹۰
۹۸۰-۱۲۰	۹۸۰	۱۲۰

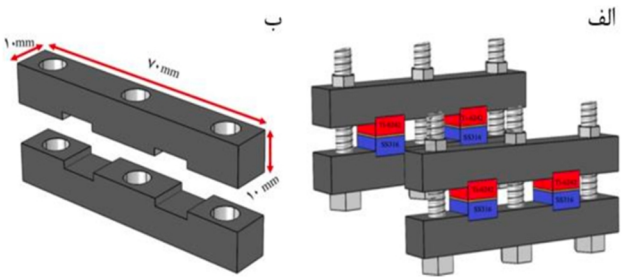


شکل1- تصویر قطعات مکعبی آلیاژ Ti-6242 (EBM).

برای اطمینان از ترکیب شیمیایی پودر اولیه مورد استفاده در قطعات EBM بر روی آن آنالیز EDS انجام شد. پودر مورد استفاده در این عملیات حاوی عناصر تیتانیوم، روی، قلع و آلومینیوم با درصدهای مشخص شده است. در این آنالیز عنصر اکسیژن شناسایی نشد که نشان از اکسید نشدن پودر دارد. همچنین به علت اینکه پودر استفاده شده، پودر از پیش آلیاژ شده است، یکنواختی پخش عناصر متفاوت در این آلیاژ در همه نقاط یکسان بود.

ورق‌های فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316 و آلیاژ تیتانیوم Ti-6242 با ابعاد 5×10×10 میلی‌متر با دستگاه ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی برش داده و سپس سطوح آن‌ها برای حذف آلودگی‌ها توسط سنباده‌زنی و پولیش آماده‌سازی شدند. نمونه‌ها پس از شست‌وشو در حمام اولتراسونیک و محلول‌های استون و اتانول، برای حذف اکسیدها در محلول HCl قرار گرفتند.

در فرایند اتصال، میان‌لایه مسی همانند شکل(2) بین دو نمونه قرار داده شده و مجموعه با فشار مناسب تثبیت شد. به دلیل دمای بالای اتصال در کوره خلأ، از فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 310 نسوز برای نگهدارنده استفاده شد که در برابر دماهای بالا مقاوم است. این نگهدارنده برای هم‌ترازی و جلوگیری از جابجایی اجزا طراحی شده و از پیچ و مهره‌های فولاد زنگ‌نزن آستنیتی برای حفظ فشار و جلوگیری از لغزش استفاده شده است.



شکل2-الف- نحوه استقرار اجزا اتصال در داخل نگهدارنده ب- طرح‌واره نگهدارنده اتصال ساخته شده.

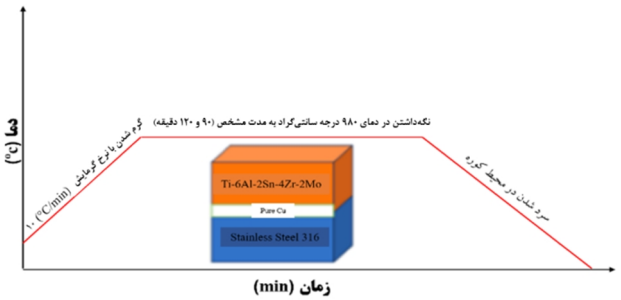
فرایند پیونددهی قطعات با روش اتصال فاز مایع گذرا در کوره‌ای با اتمسفر خلأ و فشار حدود 10^{-5} میلی‌بار در دمای 980 درجه سانتی‌گراد انجام شد تا از اکسید شدن و آلودگی سطوح جلوگیری شود. نمونه‌ها با نرخ گرمایش 10 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه به دمای مطلوب رسیده و سپس با همان نرخ تا دمای محیط سرد شدند. دمای استحاله یوتکتیک بین مس و تیتانیوم بر اساس دیاگرام فازی Ti-Cu 970 درجه سانتی‌گراد است. دمای اتصال 10 درجه بیشتر از دمای یوتکتیک و برابر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.06]

980 درجه سانتی‌گراد انتخاب شد تا از ذوب کامل لایه میانی اطمینان حاصل شود. زمان اتصال نیز با توجه به تحقیقات قبلی و آزمایش‌ها تعیین شد طرح‌واره این فرایند به‌طور خلاصه در شکل(3) نشان داده شده است.

جدول2-ترکیب شیمیایی پودر Ti-6242 استفاده شده (درصد وزنی).

Elements	درصد وزنی استاندارد	درصد وزنی اندازه‌گیری
Ti	Bal	۸۷/۰۸
Al	۵/۷۸	۵/۵۰
Sn	۲/۰۵	۲/۰۲
Mo	۱/۹۶	۱/۸۰
Zr	۳/۴۶	۳/۶۰

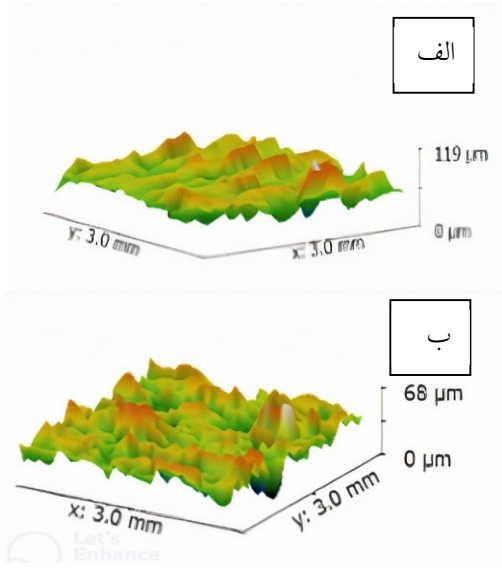


شکل3- طرح‌واره فرایند پیونددهی قطعات.

در این پژوهش تاثیر زبری سطح بر کیفیت اتصال نیز بررسی شد. برای این کار، نمونه‌ها در دو حالت برشکاری‌شده، و سنباده‌زنی و سپس پولیش‌کاری شده آماده و در حمام التراسونیک با اتانول و آب مقطر شسته شدند. آزمون زبری‌سنجی بر روی سطوح جانبی نمونه‌ها به ابعاد 1,2×1,2 سانتی‌متر با استفاده از دستگاه زبری‌سنج لیزری LPM-D1 انجام شد. دستگاه با روبش سطح، پستی و بلندی‌ها را اندازه‌گیری کرده و زبری و طرح‌واره سطح را با نرم‌افزار Gwyddion نمایش می‌دهد. دقت در تنظیمات دستگاه و ارتفاع نمونه‌ها ضروری است تا نتایج قابل مقایسه باشند.

3- نتایج و بحث

در این پژوهش تاثیر زمان و زبری سطح اتصال بر استحکام برشی اتصال فاز مایع گذرای Ti-6242/Cu/AISI 316 Stainless Steel بررسی شد. به‌دلیل ضخامت بالای لایه‌های پودر، سرعت حرکت لیزر و انرژی بالای پرتو الکترونی، زبری سطوح جانبی در قطعات ساخته شده بالا است. در رابطه با تاثیر زبری بر کیفیت اتصال، دو فرضیه مطرح می‌شود: یکی اینکه زبری بیشتر می‌تواند با تمرکز حرارتی به اتصال بهتر کمک کند و دیگری اینکه زبری کمتر نفوذ عناصر را تسهیل می‌کند. پروفیل زبری نمونه‌ها در دو حالت برشکاری‌شده و سنباده‌زنی و سپس پولیش شده در شکل(4) نشان داده شده است. مطابق شکل(4) مشخص می‌شود که زبری حالت سنباده‌زنی و سپس پولیش‌کاری شده به‌طور مشخص از زبری حالت برشکاری شده کمتر است. نمونه‌ها تحت فرایند اتصال در دمای 980 درجه سانتی‌گراد و زمان 120 دقیقه قرار گرفتند. دیده شد که اتصال با زبری کمتر، استحکام برشی حدود 200 مگاپاسکال و اتصال با زبری بیشتر، استحکام برشی حدود 67 مگاپاسکال داشت.

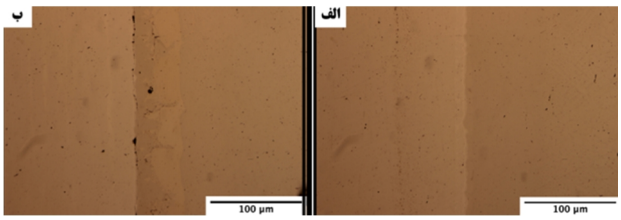


شکل4- پروفیل زبری نمونه‌های 120-980 بعد از الف- برشکاری و ب-سنباده‌زنی و پولیش‌کاری.

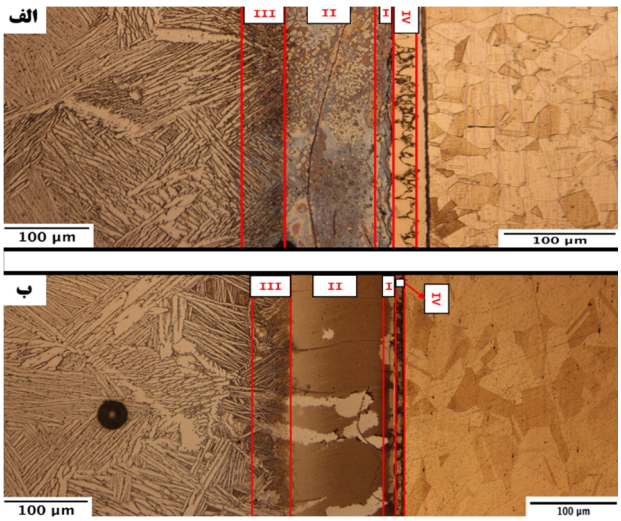
لی و همکاران [23] اثر زبری سطح بر اتصال نفوذی آلیاژ آلومینیوم 2024 به خود در فشار 5 مگاپاسکال را بررسی کردند. این پژوهش نشان می‌دهد که سطوح پیوند با زبری بیشتر منجر به بهبود استحکام کششی نهایی می‌شود. این امر به تخریب بیشتر لایه اکسید طبیعی روی سطح نسبت داده شده است که امکان تماس بیشتر فلز به فلز و بهبود پیوند متالوژیکی را فراهم می‌کند. در پژوهش حاضر، زبری بیشتر سطح منجر به استحکام کمتر اتصال شده است که احتمالا به دلیل فشار کمتر اعمالی در حین اتصال می‌باشد. زبری سطوح به‌طور طبیعی موجب ایجاد یک فاصله هوایی بین سطوح اتصال می‌شود. به نظر می‌رسد در پژوهش لی و همکاران [23]، فشار بالای اعمالی بر نمونه‌ها،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.06]

علاوه بر کمک به شکسته شدن پوسته اکسید سطحی، موجب رفع این فاصله هوایی و تماس کامل بین سطوح اتصال شده باشد. در پژوهش حاضر، در شرایط زبری بالاتر، فشار کم اعمالی نتوانسته اتصال مناسب سطوح را فراهم سازد و به همین جهت نفوذ عناصر به خوبی انجام نشده است.

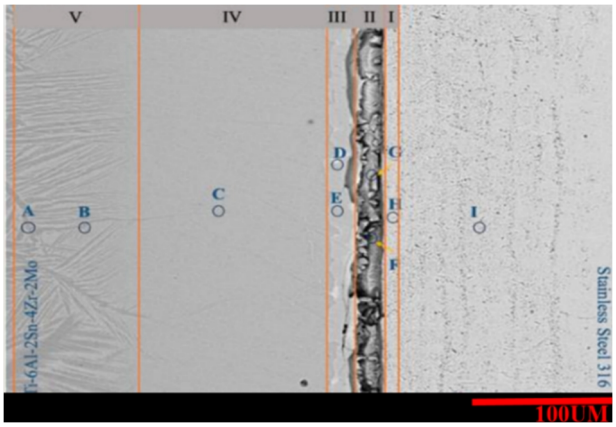


شکل5-تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه الف- 120-980 و ب- 90-980 قبل از حکاکی شیمیایی.



شکل6-تصاویر میکروسکوپی نوری بعد از حکاکی شیمیایی الف-90-980 ب-120-980

تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه‌های 90-980 و 120-980 قبل و بعد از حکاکی شیمیایی در شکل‌های(5 و 6) نشان داده شده است. همچنین شکل(7) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از محل اتصال نمونه 90-980 را نمایش می‌دهد. تصاویر متالوگرافی نمونه‌ها 4 منطقه انجماد هم‌دما (I)، انجماد غیر هم‌دما (II)، و متاثر از نفوذ در قسمت تیتانیوم (III) و فولاد (IV) را شامل می‌شود. ریزساختار اتصال نمونه 90-980 قبل و بعد از حکاکی شیمیایی در شکل(5-ب و 6-ب) نشان می‌دهد که منطقه اتصال دارای تعداد کمی حفره و ناپیوستگی است. این ناپیوستگی‌ها در تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی بهتر دیده می‌شوند. در دمای 980 درجه سانتی‌گراد، عرض منطقه اتصال به حدود 126 میکرومتر رسیده که ناشی از افزایش نفوذ عناصرآلیاژی به دلیل تـاثیر دمـا است. همچنین، منطقه DAZ در سمت آلیاژ تیتانیوم و فولاد زنگ‌نزن نیز افزایش یافته است.



شکل7-تصویر میکروسکوپی الکترونی نمونه 90-980.

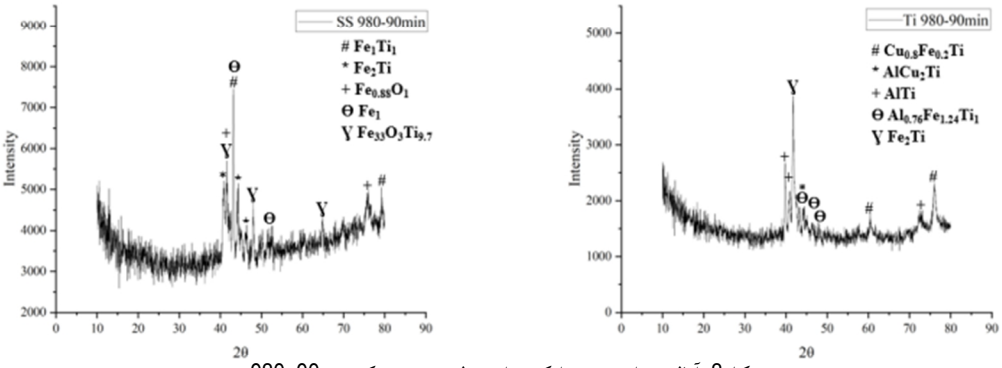
دمای980 درجه سانتی‌گراد، نفوذ مس به سمت آلیاژ تیتانیوم افزایش یافته و آلیاژ وارد فاز بتا می‌شود. هنگام سرد شدن و عبور از خط استحاله آلفا-بتا، تیغه‌های سوزنی شکل آلفا تشکیل می‌شوند. با افزایش دما، این تیغه‌ها متراکم‌تر شده و تا مناطق وسیع‌تری از اتصال کشیده می‌شوند. همچنین، منطقه انجماد غیرهمدما به‌جای مرکز اتصال، در نزدیکی فصل مشترک فلزپایه فولادی تشکیل شده که احتمالاً به دلیل ایجاد ترکیبات یوتکتیک TiCu و TiFe در فصل مشترک است. ریزساختار اتصال نمونه 120-980 قبل از حکاکی شیمیایی در شکل(5-الف)نشان‌دهنده عدم‌پیوستگی در برخی‌مناطق اتصال است. بررسی میکروسکوپی نشان می‌دهد این مناطق شامل فازهای ترد بین‌فلزی هستند که طی عملیات سنباده‌زنی و پولیش از سطح جدا می‌شوند. منطقه IV که تحت نفوذ در قسمت پایه فولادی است، در این دما عرض کمی دارد اما با افزایش زمان نگهداری از 90 به 120 دقیقه عریض‌تر و ضخیم‌تر می‌شود. پس از حکاکی شیمیایی، چهار منطقه اصلی شامل انجماد همدما، انجماد غیرهمدما و مناطق تحت تأثیر نفوذ مشخص شدند. منطقه غیرهمدما (I) با ضخامت 11 میکرومتر و منطقه همدما (II) با ضخامت 103 میکرومتر مشاهده شدند. همچنین ناحیه تحت تأثیر نفوذ در فلزپایه فولادی (IV) با ضخامت 13 میکرومتر به دلیل افزایش زمان نگهداری ضخیم‌تر شده است.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.06]

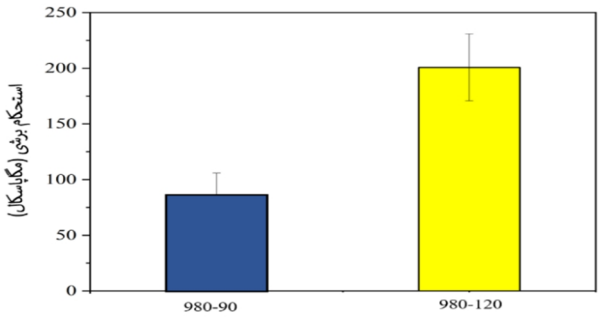
جدول3-آنالیز EDS منطقه اتصال در نمونه 90-980.

منطقه	عناصر (درصد وزنی)									
	تیتانیوم	مس	آهن	آلومینیوم	کروم	نیکل	زیرکونیم	قلع	مولبیدن	فاز پیشنهادی
A	۸۹/۹۸	۰/۵۷	۰/۵۹	۴/۱۸	۰/۳۰	۰/۶۷	۱/۷۱	۱/۲۳	۰/۷۶	Tiß
B	۸۸/۹۲	۰/۶۵	۰/۹۳	۳/۷۰	۰/۴۳	۰/۵۶	۲/۷۲	۱/۰۱	۱/۵۳	Tiß
C	۷۵/۹۸	۶/۸۵	۷/۶۰	۳/۷۳	۱/۳۲	۱/۴۵	۱/۵۵	۰/۲۱	۱/۳۰	-Ti+Ti_2Cuß
D	۳۳/۶۲	۲۱/۳۱	۱۳/۱۳	۳/۶۴	۳/۰۰	۸/۲۵	۱۵/۵۶	۱/۳۲	۱/۴۵	Ti-Cu-Fe
E	۴۴/۷۲	۱۶/۸۸	۲۶/۸۴	۱/۶۹	۲/۹۷	۴/۴۷	۰/۳۶	۰/۹۴	۱/۱۴	Fe_2Ti/FeTi
F	۴/۴۳	۱/۸۲	۶۳/۳۰	۰/۳۳	۲۴/۰۶	۴/۰۸	۰/۰۷	۱/۴۵	۰/۴۷	∝-Fe+Fe_2Ti
G	۶/۲۱	۱/۰۶	۶۱/۹۴	۰/۲۷	۲۰/۰۶	۶/۲۵	۰/۱۳	۰/۶۶	۲/۴۵	∝-Fe+Fe_2Ti
H	۰/۵۳	۱/۱۱	۷۰/۵۳	۰/۰۵	۱۵/۷۵	۱۰/۷۳	۰/۰۴	۰/۳۷	۰/۸۹	Ferrite
I	۰/۴۷	۰/۸۵	۷۰/۳۱	۰/۰۰	۱۶/۲۱	۱۰/۸۵	۰/۰۷	۰/۴۹	۰/۷۵	Ferrite



شکل8-آنالیز پراش پرتو ایکس از سطح نمونه شکست 90-980.

در فصل مشترک اتصال، افزایش زمان نگهداری باعث نفوذ بیشتر تیتانیوم به سمت فلزپایه فولادی و تشکیل فازهای آهن-تیتانیوم، مس و آلومینیوم شده است. در شکل(5-الف) تصویر متالوگرافی نمونه‌ها قبل از عملیات حکاکی شیمیایی نشان داده شده است که منطقه متاثر از نفوذ در بخش فولادی را نشان می‌دهد و شکل(6-الف) تصویر متالوگرافی نمونه‌ها را بعد از عملیات حکاکی شیمیایی نشان می‌دهد.

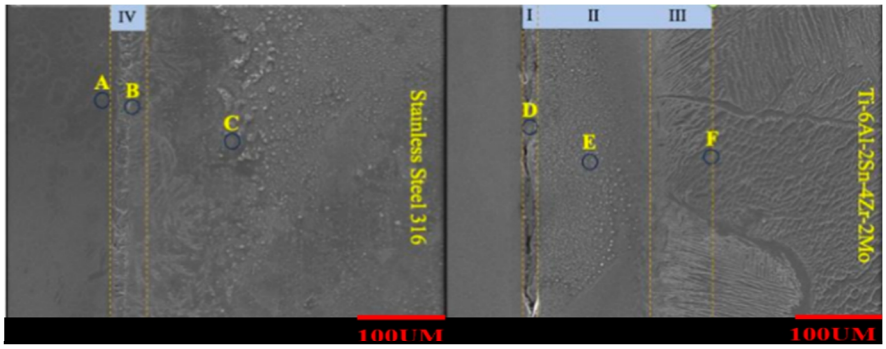


شکل9-استحکام برشی اتصالات انجام شده.

تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه 90-980 در شکل(7) نشان داده شده و در جدول(3) درصد وزنی عناصر مناطق مختلف مشخص شده است. منطقه اتصال نمونه 90-980، مناطق A و B با 90 درصد وزنی تیتانیوم و مقادیر کمی آهن و مس وارد فاز بتا می‌شوند.

ناحیه C با 76 درصد تیتانیوم و 7 درصد مس نیز وارد فاز بتا شده و به دلیل وجود مس، این فاز تا دمای محیط پایدار می‌ماند. در این منطقه، یک فاز محلول جامد تشکیل شده است. منطقه غیرهمدما نزدیک فلزپایه فولادی شامل ترکیبات Ti_2Cu است. همچنین، نوار سیاه‌رنگی با ترکیبات Ti_2Cu و FeTi دیده می‌شود. مناطق نزدیک فلزپایه فولادی نشان‌دهنده فاز فریت با درصد بالای آهن و کروم هستند. نتایج آزمون پراش پرتو ایکس از سطح شکست این نمونه در شکل(8) نشان داد که در دمای 980 درجه سانتی‌گراد و زمان90 دقیقه، ترکیبات Ti-Cu در سمت آلیاژ تیتانیوم کاهش یافته و بیشتر ترکیبات مشاهده شده برپایه Ti-Fe هستند. این نشان می‌دهد که با افزایش دمای اتصال، نفوذ تیتانیوم به سمت فلزپایه فولادی بیشتر شده است. همچنین، در سمت فلزپایه فولادی در دمای 980 درجه سانتی‌گراد، هیچ ترکیبی بر پایه مس یافت نشد و به‌جای آن ترکیبات Fe-Ti و Cr-Ti تشکیل شده‌اند. این نتایج با سایر پژوهش‌ها درباره آلیاژ Ti-6Al-4V که دارای خواصی نزدیک به آلیاژ Ti-6242 است، همخوانی دارد و همچنین ترکیبات بین‌فلزی بر پایه تیتانیوم درسطح شکست دیده شده‌اند. تحولات فازی و ریزساختاری در فصل مشترک اتصال نمونه

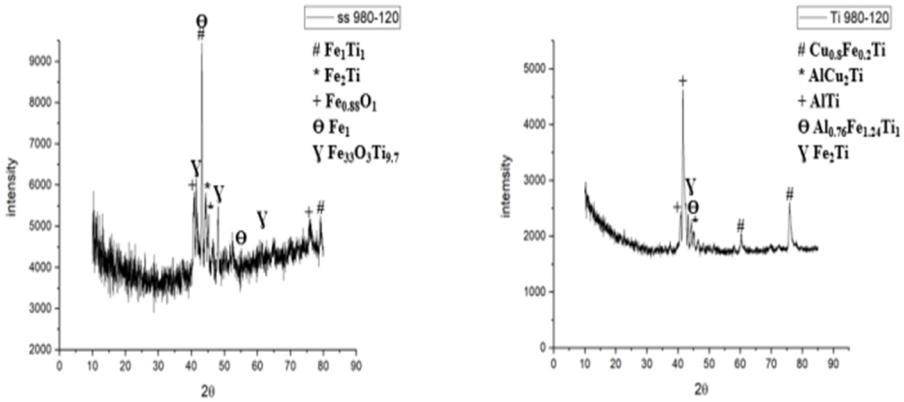
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-11]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.06]



شکل10- تصویر میکروسکوپی الکترونی نمونه 120-980.

جدول4-آنالیز EDS منطقه اتصال در نمونه 120-980.

عناصر (درصد وزنی)										
منطقه	تیتانیوم	مس	آهن	آلومینیوم	کروم	نیکل	زیرکونیم	قلع	مولبیدن	فاز پیشنهادی
A	۶/۲۱	۱/۰۶	۶۱/۹۴	۰/۲۷	۲۰/۰۶	۶/۲۵	۰/۱۳	۰/۶۶	۲/۴۵	α-Fe+Fe_2Ti
B	۰/۵۳	۱/۱۱	۷۰/۵۳	۰/۰۵	۱۵/۷۵	۱۰/۷۳	۰/۰۴	۰/۳۷	۰/۸۹	Ferrite/ Fe_2Ti
C	۰/۴۷	۰/۸۵	۷۰/۳۱	۰/۰۰	۱۶/۲۱	۱۰/۸۵	۰/۰۷	۰/۴۹	۰/۷۵	Ferrite
D	۴۲/۹۱	۲۳/۳۲	۲۱/۳۴	۲/۲۸	۳/۶۱	۳/۴۹	۱/۵۱	۱/۴۹	۱/۱۸	Fe_2Ti/Ti_2Cu
E	۶۰/۳۰	۱۴/۶۳	۹۶/۱۰	۴/۸۷	۴/۱۰	۲/۳۹	۱/۹۵	۰/۲۱	۱/۳۰	FeTi/Ti_2Cr/$TiAl_3$
F	۷۰/۸۶	۸/۱۵	۶/۰۸	۵/۲۱	۲/۲۶	۲/۹۴	۲/۵۰	۱/۰۱	۱/۵۳	Tiß



شکل11-آنالیز پراش پرتو ایکس نمونه شکست 120-980.

سه منطقه اصلی انجماد همدما، غیرهمدما و مناطق تحت تأثیر نفوذ را نشان می‌دهد که در شکل(10) و جدول(4) به نمایش گذاشته شده است.

با توجه به نتایج پراش پرتو ایکس، مطابق با شکل(11) در دمای 980 درجه سانتی‌گراد و زمان 120 دقیقه با افزایش زمان نگهداری نسبت به 90 دقیقه، شدت فازهای بین‌فلزی FeTi در سمت فولادی و AlTi در سمت تیتانیومی افزایش یافته است که می‌تواند باعث کاهش استحکام برشی شود. همچنین ترکیب آهن، اکسیژن و تیتانیوم در سمت پایه فولادی تشکیل شده است.

تمامی نتایج بدست آمده از آزمون پراش پرتو ایکس و EDS با تحقیقات دیگری که نزدیک به این تحقیق است مشابه بوده اما با توجه به تفاوت آلیاژ تیتانیوم استفاده شده در این پژوهش تغییرات کمی نسبت به سایر پژوهش‌ها مشاهده می‌شود.

در پژوهش آقایی و همکاران [24] در دمای 900، 950 و 1000درجه سانتی‌گراد به مدت زمان 60 دقیقه اتصال آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به فولاد زنگ‌نزن 304 با میان لایه مسی را بررسی کردند و ترکیباتی همچون Fe_2Ti، CuTi و $AlCu_2Ti$ گزارش شده است.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.06]

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش زمان برای اتصال فاز مایع گذرا بین آلیاژ تیتانیوم‌Ti6242 ساخت افزایشی شده به‌روش ذوب پرتو الکترونی و ورق فولاد زنگ‌نزن 316L بررسی شد. مهم‌ترین نتایج پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

-با افزایش زمان اتصال، عرض منطقه اتصال در نمونه‌ها به دلیل افزایش نفوذ عناصر افزایش یافت.

-با افزایش زمان اتصال، ضخامت ناحیه انجماد هم‌دما به‌دلیل همگن شدن ترکیب افزایش و ضخامت ناحیه انجماد غیرهم‌دما کاهش یافت.

-فازهای ترد بین فلزی اصلی بوجود آمده در ناحیه اتصال نمونه‌ها شامل فازهای FeTi، Fe_2Ti و TiCu می‌باشد.

-در دمای 980 درجه سانتی‌گراد فاز بین‌فلزی FeTi بیشترین میزان را نسبت به سایر حالات اتصال داشت و بیشترین سختی در این نمونه‌ها به‌دست آمد.

-با افزایش زمان اتصال، مقدار فاز بین‌فلزی TiCu کاهش یافته و جای خود را به فازهای دیگری شامل Al-Fe-Ti می‌دهند.

-شرایط مناسب اتصال، به‌صورت دمای 980 درجه سانتی‌گراد و زمان 120 دقیقه و استحکام برشی برابر با 200 مگاپاسکال به‌دست آمد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری‌های فنی ارزشمند آقای مهندس صفری، کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان، و آقای مهندس عابدی، دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان، سپاسگزاری می‌شود.

منابع

1-Elrefaey, A., et al., "Microstructure and mechanical properties of brazed titanium/steel joint,:" J.Mater.Sci, 2007, 23: p.9553-9558.
2-ASM international, "ASM Handbook. Nonferrous Alloys and special-purpose Materials," MetHandb 1992, 2..
3- Ralph, B., et al., "Titanium Alloys: An atlas of structures and fracture features," Mater Chract, 2008, 59: p. 348.
4- Matthew, J., et al., "Heat Treating. Titanium and Its Alloys," ASM Int, 2000: p.381
5-Blanchet,B., et al., "Welding of Titanium.," Rev. Cah. D Informations Tech., 1974, 71: p.99-105.
6- Welsch, G., et al., "Materials Properties Handbook: Titanium Alloys" ASM International, 1993.
7-GL, W.J., "Titanium, Berlin," Springer, 2007.
8-.Outkumpu, "Handbook of Stainless Steel" 2013: p. 1-89.
9- EuroInox, "Stainless Steel at High Tempreture," Mater. Apple. Ser., 2012, 18 : p. 1-40.
10-De Paula, M. S., et al., "Carbon Steel corrosion induced by sulphate-reducing bacteria in artificial seawater: Electrochemical and morphological characterization," Rev. Mater, 2016, 21 : p. 987-995.
11-He, P.m, et al., "Interfacial microstructure of induction brezed joints of TiAl-based intermetallics to steel 35CrMo with AhCuNiLi filler," Mater. Sci. Eng. A, 2005, 408 : p. 195-201.
12-Munis, A., et al., "Diffusion bonding of SS-316 with Zircaloy-4 by introducing multicomponent interlayer," Adv. Mater, 2007, 17 : p. 12-15.
13-Cook III, G. O., et al., "Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding,"J. Mater. Sci, 2011, 46: p. 5303-5323.
14-Al Hazaa, A., et al.,"Transient liquid phase bonding (TLP) bonding of Al7075 to Ti-6Al-4V alloy," Mater. Charact, 2010, 61: p. 312-317.
15-Gibson, I., et al.,"Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid prototyping, and Direct Digital Manufacturing," Rapid Manuf. Assoc, 2013, 16: p. 10-12.
16-Abdulhameed, O., et al.,"Additive manufacturing: Challenges, trends and applications," Adv. Mech. Eng, 2019, 11: p. 2-8.
17-Ahmed, N., et al.,"Direct metal fabrication in rapid prototyping: A review," J.Manuf. Process, 2019, 42: p. 167-191.
18-Murr, L. E,"Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies," J. Mater. Sci. Technol, 2012, 28: p. 1-14.
19-Lunetto, V., et al.,"Unit process energy consumption analysis and models for Electron Beam Melting (EBM): Effect of process and part designs," Addit. Manuf,2020, 33: p. 21-34.
20-Gokuldoss, P. K., et al.,"Additive manufacturing processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and binder jetting-selection guidelines," Materials (Basel), 2017, 10: p. 52-63.
21-ghorbani, H. R,. et al,."Hybrid additive manufacturing of an electron beam powder fused Ti-6Al-4V by transient liquid phase bonding," J. Mater. Res. Technol, 2022, 20: p. 180-194.
22-Peters, M., et al.,"Titanium and Titanium alloys: Fundamentals and Applications," Titan. Titan. Alloy. Fundam. Appl, 2003, 1: p. 513.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.06]

23-Lee, P., et al.,"Effect of Surface Roughness on the Diffusion Bonding of 2024 Aluminum Alloy" World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering, 2022., 22: p. 119.

24-Iman, A, Gh., et al.,"Ttansient liquid phase (TLP) bonding of Ti-6Al-4V/AISi 304 stainless steel using Cu/CNT composite interlayer" J. Mater. Tech, 2022, 20: p. 4052-4065.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.06]