



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

M. K. Vojdandpak, 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](mailto:behzn@cc.iut.ac.ir)



## تأثیر 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 شمعیان

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 تأثیر 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 قابل توجهی 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 زنگ‌نزن 316، زمان اتصال، زبری سطح.

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: [behzn@cc.iut.ac.ir](mailto:behzn@cc.iut.ac.ir)

### 1- مقدمه

است که می‌تواند در دماهای مختلف، از پایین‌ترین تا حدود 600 درجه سانتی‌گراد، پایدار بماند [2]. تیتانیوم به سرعت در تماس با اکسیژن لایه اکسیدی پایدار تشکیل می‌دهد که آن را در برابر خوردگی مقاوم می‌سازد [3]. این فلز در دمای اتاق 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 5 دسته، آلفا، بتا، شبه آلفا، شبه بتا و آلفا-بتا، تقسیم می‌شوند

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

[3].

سپس در دمایی پایین تر از دمای ذوب لایه واسط، حرارت داده می شود. با ذوب لایه واسط و نفوذ عناصر آلیاژی بین مذاب و فلزپایه، ترکیب شیمیایی تغییر کرده و دمای انجماد مذاب افزایش می یابد. این فرایند باعث می شود 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 هم دما و همگن سازی ضروری است. انتخاب نامناسب دمای فرایند، از یک طرف می تواند منجر به تشکیل ترکیبات بین فلزی و کاهش سرعت فرایند شود [13]. همچنین در صورت باقی ماندن مذاب تبدیل نشده در ناحیه اتصال، با تبدیل این مذاب در مرحله سرد شدن به ساختارهای یوتکتیکی، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی کاهش می یابد. برای جلوگیری از این مسئله، فرایند باید در دمای پایین تر انجام شود که زمان و هزینه را افزایش می دهد [14]. در صورتی که اتصال پیش از تکمیل انجماد هم دما سرد شود، در خط مرکزی ناحیه ای تشکیل می شود که به صورت غیرهمدما منجمد شده است. در دو طرف این ناحیه، منطقه ای دیده می شود که به صورت هم دما منجمد شده است. در پایان، در اثر نفوذ عناصر لایه واسط به فلزپایه، در فلزپایه در نواحی نزدیک فصل مشترک اتصال، منطقه ای تشکیل می شود که از عناصر لایه واسط غنی تر 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 گرفته اند. روش های سنتی تولید قطعات فلزی مانند ریخته گری، متالورژی پودر، شکل دهی، جوشکاری و ماشین کاری دارای مزایا و محدودیت های خاص خود هستند، اما سرعت تولید پایین و محدودیت های شکل دهی از مشکلات آنهاست [15]. در مقابل، فرایندهای ساخت افزودنی امکان تولید قطعات نزدیک به شکل نهایی، طراحی سبک وزن و سفارشی سازی را با سرعت بالاتر برای تولید محدود فراهم می کنند [16]. از مهم ترین روش های ساخت افزودنی، می توان به ذوب انتخابی با

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 می کند [6]. آلیاژ Ti-6242 برای کاربردهای دمای بالا در صنایع هوایی و توربین ها تا 500 درجه سانتی گراد استفاده می شود. دمای استحاله بتا (حدود 995 درجه سانتی گراد) در طراحی عملیات حرارتی این آلیاژ اهمیت زیادی دارد و تحت تاثیر ترکیب شیمیایی آن است [7].

فولادهای زنگ نزن شامل آستنیتی، فریتی و مارتنزیتی با حداقل ۱۰/۵ درصد کروم هستند و به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی و خواص مکانیکی مناسب، در صنایعی مانند ساختمان سازی، حمل و نقل، پتروشیمی، پزشکی و صنایع غذایی به کار می روند [8]. فولادهای زنگ نزن آستنیتی به دلیل انعطاف پذیری بالا، جوش پذیری بهتر، و افزایش استحکام با کار سرد، نسبت به سایر گروه های فولاد برتری دارند [9]. از بین این فولادها، فولاد 316 کم کربن، به دلیل خواص زیستی عالی، بیشترین کاربرد را در حوزه های پزشکی و بیومتریال دارد [10]. اتصال غیرمشابه فولادهای زنگ نزن و آلیاژهای تیتانیوم در صنایعی مانند سکوی نفتی و جوشکاری تیغه های موتور هواپیما استفاده می شود. همچنین کوپلینگ های تیتانیوم- فولاد در ایمپلنت های دندان و مفاصل جذاب هستند [11]. روش های جوشکاری ذوبی به دلیل تشکیل ساختارهای شکننده در محل جوش برای اتصال این آلیاژها توصیه نمی شود و از روش های غیرذوبی مانند جوشکاری اصطکاکی و نفوذی استفاده می شود [1]. پژوهش ها نشان داده اند که ترکیبات شکننده آهن-تیتانیوم در منطقه اتصال باعث کاهش چقرمگی اتصال می شود و روش اتصال فاز مایع گذرا می تواند این مشکل را بهبود بخشد [1].

اتصال فاز مایع گذرا (TLP) فرایندی است که برای اتصال مواد مشابه و غیرمشابه استفاده می شود. در این روش، یک لایه واسط با دمای ذوب مشخص بین دو قطعه قرار می گیرد و

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، به جای 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 به صورت 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 آلیاژ Ti-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 متأثر از نفوذ، و ناحیه اتصال با برهم‌کنش عناصر مس، تیتانیوم و آهن است. آنالیز EDS نشان داد که فازهای تیتانیوم آلفا-بتا،  $TiCu_2$ ،  $TiCu_4$  و فازهای بین‌فلزی FeTi و  $FeTi_2$  در ناحیه اتصال تشکیل می‌شوند. بیشترین سختی به دلیل تشکیل فازهای ترد در نزدیکی فولاد زنگ نزن 304 رخ داده و استحکام برشی 195 مگاپاسکال به دست آمد.

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. به منظور بررسی ترکیب شیمیایی فلزات پایه و عدم خطا در آنالیزهای پیش‌رو، هر دو ورق به کمک 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 دیگرام دوتایی Ti-Cu، مس و تیتانیوم در دمای 890 و

در 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.

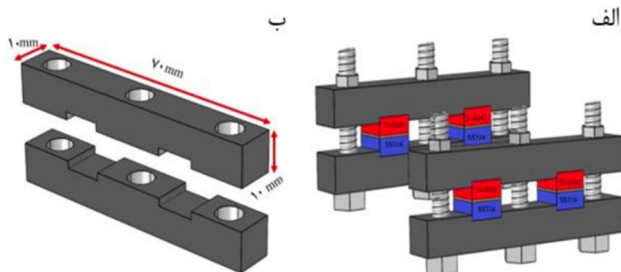
## 2- مواد و روش پژوهش

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 به دست 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، به دلیل پخش شدن فاز مایع یوتکتیک، استحکام برشی افزایش می‌یابد [21]. اخیراً قربانی و همکاران [22] اتصال غیرمشابه بین

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  $10 \times 10 \times 5$  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.



شکل 2- 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

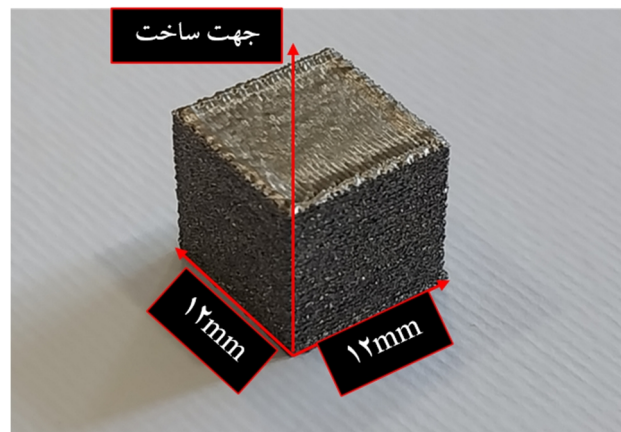
970 درجه سانتی‌گراد تشکیل یوتکتیک می‌دهند [22].

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.

جدول 1- 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 خلأ  $10^{-5}$ .

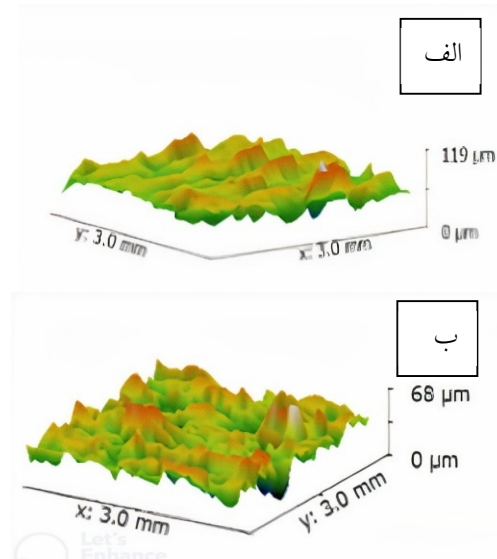
ردیف	دما (°C)	زمان (min)
۹۰-۹۸۰	۹۸۰	۹۰
۹۸۰-۱۲۰	۹۸۰	۱۲۰



شکل 1- 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

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 برشکاری شده و سنباده‌زنی و سپس پولیش شده در شکل (4) نشان داده شده است. مطابق شکل (4) مشخص می‌شود که زبری حالت سنباده‌زنی و سپس پولیش کاری 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.



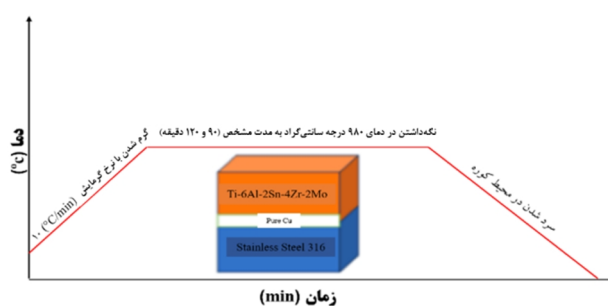
شکل 4- پروفیل زبری نمونه‌های 120-980 بعد از الف- برشکاری و ب- سنباده‌زنی و پولیش کاری.

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 متالورژیکی را فراهم می‌کند. در پژوهش حاضر، زبری بیشتر سطح منجر به استحکام کمتر اتصال شده است که احتمالاً 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،

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.

جدول 2- ترکیب شیمیایی پودر Ti-6242 استفاده شده (درصد وزنی).

Elements	درصد وزنی استاندارد	درصد وزنی اندازه‌گیری
Ti	Bal	87/08
Al	5/78	5/50
Sn	2/05	2/02
Mo	1/96	1/80
Zr	3/46	3/60



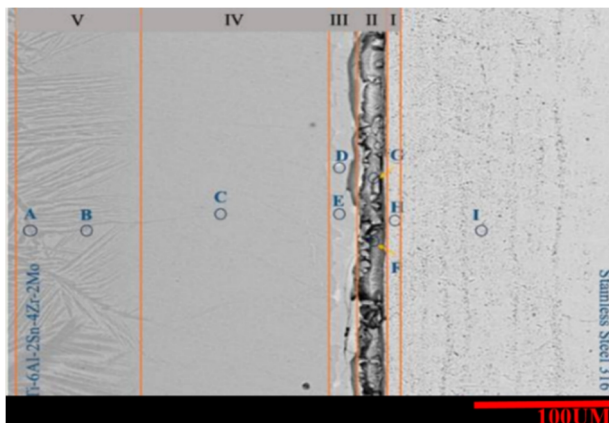
شکل 3- طرح‌واره فرایند پیونددهی قطعات.

در این پژوهش تاثیر زبری سطح بر کیفیت اتصال نیز بررسی شد. برای این کار، نمونه‌ها در دو حالت برشکاری شده، و سنباده‌زنی و سپس پولیش کاری شده آماده و در حمام التراسونیک با اتانول و آب مقطر شسته شدند. آزمون زبری‌سنجی بر روی سطوح جانبی نمونه‌ها به ابعاد 1,2x1,2 سانتی‌متر با استفاده از دستگاه زبری‌سنج لیزری LPM-D1 انجام شد. دستگاه با رویش 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. به دلیل 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

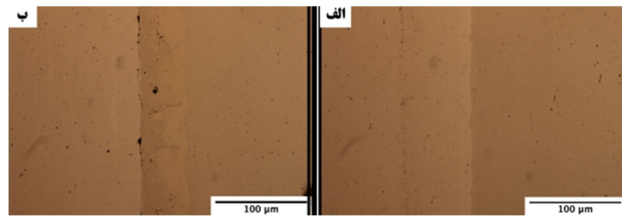
اتصال به حدود 126 میکرومتر رسیده که ناشی از افزایش نفوذ عناصر آلیاژی به دلیل تاثیر دما است. همچنین، منطقه DAZ در سمت آلیاژ تیتانیوم و فولاد زنگ‌نزن نیز افزایش یافته است.



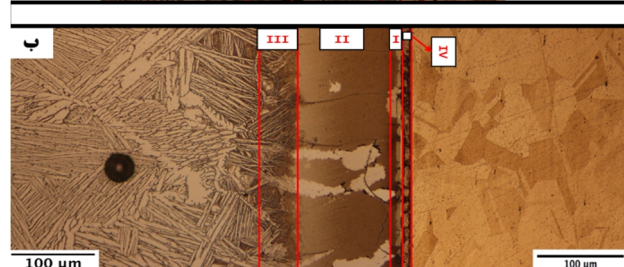
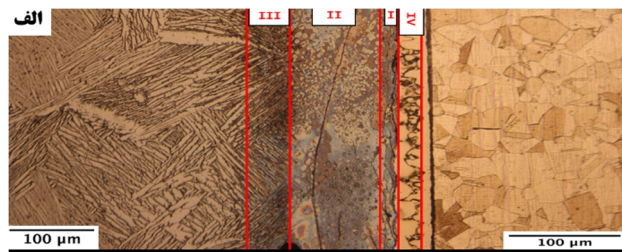
شکل 7- تصویر میکروسکوپی الکترونی نمونه 980-90.

دمای 980 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 به جای مرکز اتصال، در نزدیکی فصل مشترک فلز پایه فولادی تشکیل شده که احتمالاً به دلیل ایجاد ترکیبات یوتکتیک TiCu و TiFe در فصل مشترک است. ریزساختار اتصال نمونه 980-120 قبل از حکاکی شیمیایی در شکل (5-الف) نشان‌دهنده عدم پیوستگی در برخی مناطق 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 فلز پایه فولادی (IV) با ضخامت 13 میکرومتر به دلیل افزایش زمان نگهداری ضخیم‌تر شده است.

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.



شکل 5- تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه الف - 980-120 و ب - 980-90 قبل از حکاکی شیمیایی.

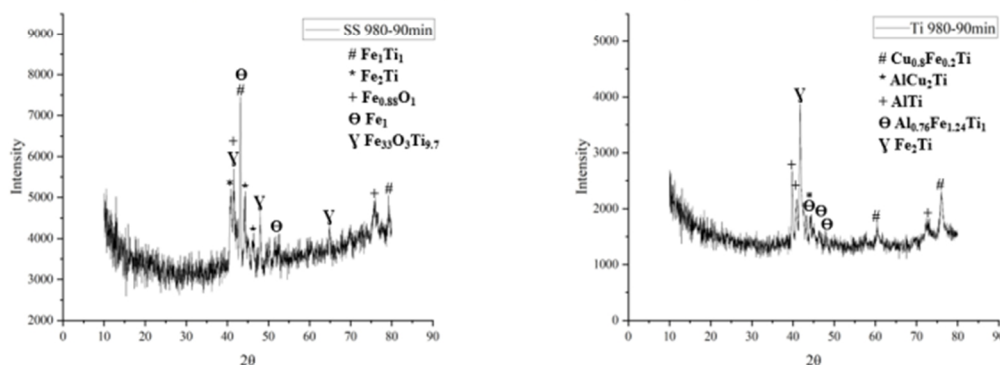


شکل 6- تصاویر میکروسکوپی نوری بعد از حکاکی شیمیایی الف - 980-90 و ب - 980-120.

تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه‌های 980-90 و 980-120 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 980-90 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 980-90 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

جدول 3-آنالیز EDS منطقه اتصال در نمونه 90-980.

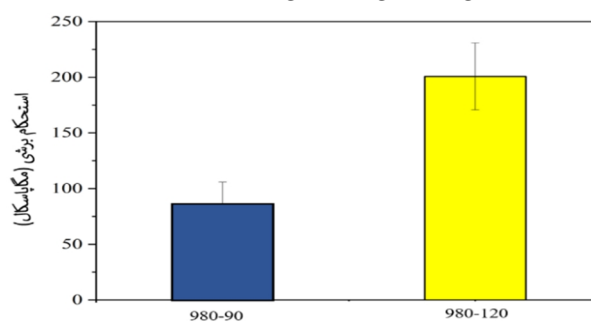
عناصر (درصد وزنی)										
منطقه	تیتانیوم	مس	آهن	آلومینیوم	کروم	نیکل	زیرکونیم	قلع	مولیبدن	فاز پیشنهادی
A	۸۹/۹۸	۰/۵۷	۰/۵۹	۴/۱۸	۰/۳۰	۰/۶۷	۱/۷۱	۱/۲۳	۰/۷۶	Ti $\beta$
B	۸۸/۹۲	۰/۶۵	۰/۹۳	۳/۷۰	۰/۴۳	۰/۵۶	۲/۷۲	۱/۰۱	۱/۵۳	Ti $\beta$
C	۷۵/۹۸	۶/۸۵	۷/۶۰	۳/۷۳	۱/۳۲	۱/۴۵	۱/۵۵	۰/۲۱	۱/۳۰	-Ti+Ti $_2$ Cu $\beta$
D	۳۳/۶۲	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 $_2$ Ti/FeTi
F	۴/۴۳	۱/۸۲	۶۳/۳۰	۰/۳۳	۲۴/۰۶	۴/۰۸	۰/۰۷	۱/۴۵	۰/۴۷	$\alpha$ -Fe+Fe $_2$ Ti
G	۶/۲۱	۱/۰۶	۶۱/۹۴	۰/۲۷	۲۰/۰۶	۶/۲۵	۰/۱۳	۰/۶۶	۲/۴۵	$\alpha$ -Fe+Fe $_2$ Ti
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	۱۶/۳۱	۱۰/۸۵	۰/۰۷	۰/۴۹	۰/۷۵	Ferrite



شکل 8-آنالیز پراش پرتو ایکس از سطح نمونه شکست 980-90.

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 غیرهمدمای نزدیک فلزپایه فولادی شامل ترکیبات Ti $_2$ Cu است. همچنین، نوار سیاه‌رنگی با ترکیبات FeTi و Ti $_2$ Cu 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 زمان 90 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 به جای 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 در سطح شکست دیده شده‌اند. تحولات فازی و ریزساختاری در فصل مشترک اتصال نمونه

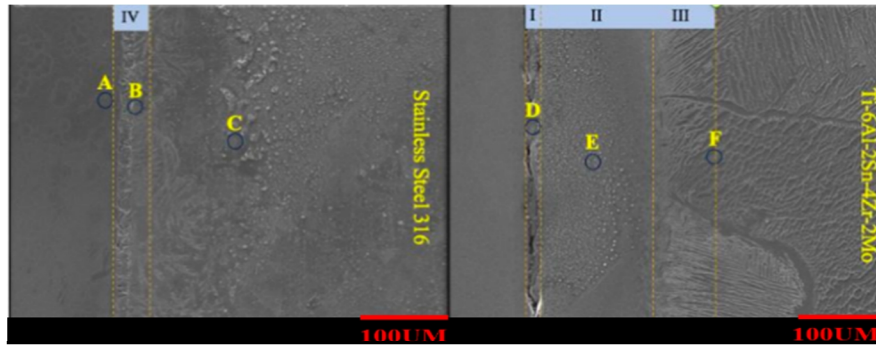
در فصل مشترک اتصال، افزایش زمان نگهداری باعث نفوذ بیشتر تیتانیوم به سمت فلزپایه فولادی و تشکیل فازهای آهن-تیتانیوم، مس و آلومینیوم شده است. در شکل (5-الف) تصویر متالوگرافی نمونه‌ها قبل از عملیات حکاکی شیمیایی نشان داده شده است که منطقه متاثر از نفوذ در بخش فولادی را نشان می‌دهد و شکل (6-الف) تصویر متالوگرافی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



شکل 9-استحکام برشی اتصالات انجام شده.

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

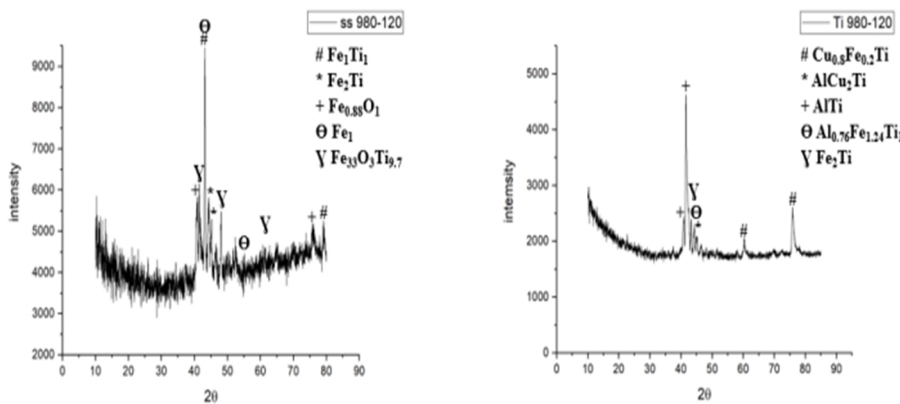




شکل 10- تصویر میکروسکوپی الکترونی نمونه 120-980.

جدول 4-آنالیز EDS منطقه اتصال در نمونه 120-980.

عناصر (درصد وزنی)										
منطقه	تیتانیوم	مس	آهن	آلمینیوم	کروم	نیکل	زیرکونیم	فلج	مولیبدن	فاز پیشنهادی
A	۶/۲۱	۱/۰۶	۶۱/۹۴	۰/۲۷	۲۰/۰۶	۶/۲۵	۰/۱۳	۰/۶۶	۲/۴۵	$\alpha$ -Fe+Fe <sub>2</sub> Ti
B	۰/۵۳	۱/۱۱	۷۰/۵۳	۰/۰۵	۱۵/۷۵	۱۰/۷۳	۰/۰۴	۰/۳۷	۰/۸۹	Ferrite/Fe <sub>2</sub> Ti
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 <sub>2</sub> Ti/Ti <sub>2</sub> Cu
E	۶۰/۳۰	۱۴/۶۳	۹۶/۱۰	۴/۸۷	۴/۱۰	۲/۳۹	۱/۹۵	۰/۲۱	۱/۳۰	FeTi/Ti <sub>2</sub> Cr/TiAl <sub>3</sub>
F	۷۰/۸۶	۸/۱۵	۶/۰۸	۵/۲۱	۲/۲۶	۲/۹۴	۲/۵۰	۱/۰۱	۱/۵۳	Ti $\beta$



شکل 11-آنالیز پراش پرتو ایکس نمونه شکست 120-980.

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 آقای و همکاران [24] در دمای 900، 950 و 1000 درجه 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<sub>2</sub>Ti، CuTi و AICu<sub>2</sub>Ti گزارش شده است.

سه منطقه اصلی انجماد همدم، غیرهمدم 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 AITi 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.

## 4- نتیجه گیری

در این پژوهش زمان برای اتصال فاز مایع گذرا بین آلیاژ تیتانیوم Ti6242 ساخت افزایشی شده به روش ذوب پرتو الکترونی و ورق فولاد زنگ نزن 316L بررسی شد. مهم ترین نتایج پژوهش به شرح زیر می باشد:

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

- با افزایش زمان اتصال، ضخامت ناحیه انجماد هم دمما به دلیل همگن شدن ترکیب افزایش و ضخامت ناحیه انجماد غیر هم دمما کاهش یافت.

- فازهای ترد بین فلزی اصلی بوجود آمده در ناحیه اتصال نمونه ها شامل فازهای FeTi، Fe<sub>2</sub>Ti و TiCu می باشد.

- در دمای 980 درجه سانتی گراد فاز بین فلزی FeTi بیشترین میزان را نسبت به سایر حالات اتصال داشت و بیشترین سختی در این نمونه ها به دست آمد.

- با افزایش زمان اتصال، مقدار فاز بین فلزی TiCu کاهش یافته و جای خود را به فازهای دیگری شامل Al-Fe-Ti می دهند.

- شرایط مناسب اتصال، به صورت دمای 980 درجه سانتی گراد و زمان 120 دقیقه و استحکام برشی برابر با 200 مگاپاسکال به دست آمد.

## تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری های 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 می شود.

## 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 Charact, 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 Temperature," 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 brazed 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.

24-Iman, A, Gh., et al., "Transient 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.

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.