نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال هفتم، شماره1، بهار و تابستان 1400، صفحه 39-29

تاثیر متغیرهای جوشکاری لیزر نقطه ای بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال غیر هم‌جنس Ti-6Al-4V به AISI 304

محسن رفیع[1]، حامد ثابت[2*]، وحید ابوئی مهریزی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

2- دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

3- استادیار مرکز تحقیقات مهندسی مواد پیشرفته، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

(دریافت مقاله: 1399/09/13؛ پذیرش مقاله: 1400/03/28)

چکیده

در این پژوهش اتصال غیر هم جنس ورق‌های Ti-6Al-4V و AISI 304 به روش جوشکاری لیزر نقطه ای مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ورق‌های مذکور به ضخامت 0/7 و 0/5 میلی‌متر با استفاده از لایه واسط مس یا نقره (خالص) به ضخامت 0/2 و 0/3 میلی‌متر با استفاده از دستگاه جوش لیزر پالسی 400 وات (Nd:YAG) و به روش نقطه جوش‌های هم مرکز به قطر 4 میلی‌متر در حالت روی هم جوشکاری شدند و مورد آزمایش و بررسی قرار گرفتند. ابتدا بازرسی چشمی و سپس متالوگرافی نوری صورت گرفت و در صورت عدم وجود ترک آزمون‌های سختی ویکرز، کشش و بررسی میکروسکپی الکترونی روبشی بر روی نمونه‌ها انجام شد و نتایج آزمون‌ها حاکی از آنست که در فلز نقره به‌عنوان لایه واسط استفاده شده با زمان 3 میلی ثانیه هیچگونه اتصالی ایجاد نشد و جابجایی فلز رویی نیز تاثیری در نتیجه نداشت و بهترین شرایط اتصال در شرایطی است که AISI 304 در معرض جوش لیزر باشد با استفاده از لایه واسط از جنس مس، حرارت ورودی 10/7 ژول، قله توان 1/5 کیلووات، فرکانس 15 هرتز و زمان 7 میلی ثانیه بهترین نتیجه بدست آمد و سختی منطقه جوش و استحکام نهایی به ترتیب 504 ویکرز و 160 مگا پاسکال بدست آمد.

کلمات کلیدی: جوشکاری لیزر نقطه ای، اتصال غیرهم‌جنس، Ti-6Al-4V، AISI 304 .

Effect of Laser Spot Welding Variables on Microstructure and Mechanical Properties of the Ti-6Al-4V to AISI304 Dissimilar Joint

M. Rafi[1], H. Sabet[2*], V. Abouei Mehrizi[3]

1-MS Student of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

2- Associate Professor, Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

3- Assistant Professor, Advanced Materials Engineering Research Center, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

(Received 3 December 2020 ; Accepted 18 June 2021)

Abstract

In this project, joining Ti-6Al-4V and AISI 304 dissimilar plates by laser-spot-welding method has been studied. In this regard, Ti-6Al-4V and AISI 304 plates, with a thickness of 0.7 and 0.5 respectively, were lap-welded using an interlayer of 0.2 & 0.3 mm copper and silver (pure silver). The process was done by 400Watt pulsed laser (Nd:YAG) using oncentric spot welding with 4mm diameter circles as lap welding. Once the spots were created, they got studied and

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.3.4]

surveyed first by eye inspection, then by optic metallography inspection and finally, by tensile strength and SEM; of course, if cracks were not detected on joining. The results proved copper a better interlayer compared to silver: no joining occurred while using silver as an interlayer for 3 milliseconds, and replacing the upper metal didn't change the outcome. The best joining result was observed when AISI 304 was placed above (near the laser), copper plate interlayer was used in 7 milliseconds, with 15 Hz frequency, 10.7 J heat input and 1.5 KW peak-power. This way, sheer strength equaled 160 MPa and micro hardness equaled 504 HV.

Keywords: Laser spot welding, Dissimilar joining, Ti-6Al-4V, AISI 304.

1- مقدمه

تیتانیم چهارمین عنصر از لحاظ فراوانی در پوسته زمین و نهمین فلز صنعتی در دنیاست و در بسیاری از محیط‌های خورنده مقاوم بوده اکسید نمی‌شود. در عین حال با چگالی 4/5 gr/cc و 40% سبکتر از فولاد است. اما از استحکام کششی900-1100 MPa بالاتری نسبت به فولاد برخوردار است. همچنین زیست سازگار و غیرسمی است و حتی در دماهای زیر صفر نیز چقرمگی خود را حفظ می‌کند [1]. پرکاربردترین آلیاژ تیتانیم Ti-6Al-4V می‌باشد. آلیاژهای تیتانیم به سه گروه آلفا، آلفا-بتا و بتا تقسیم‌بندی می‌شوند و آلیاژ Ti-6Al-4V نیز جزو آلیاژهای آلفا و بتا می‌باشد [1].

فولاد زنگ نزن304 AISI یکی ازپر کاربردترین آلیاژ در خانواده فولادهای زنگ نزن می‌باشد که حاوی 18درصدکروم و8 درصد نیکل بوده, بیش از 50% مصرف جهانی فولادهای زنگ نزن را بخود اختصاص می‌دهد [2]. در صنایعی مانند صنایع شیمیایی، نیروگاهی، دارویی، غذایی و هوافضا اتصال فلزات و آلیاژهای غیر هم‌جنس به یکدیگر بیشتر مشاهده می‌شود [3].

جوشکاری ذوبی دو آلیاژ به یکدیگر به دلیل تشکیل فازهای بین فلزی ترد قابل انجام نیست و می‌بایست از روش‌های جوشکاری حالت جامد و یا روش‌های متمرکز انرژی یا سوراخ کلید بهره جست. مشکل اصلی در اتصال دو آلیاژ تیتانیم و فولاد زنگ نزن تشکیل فاز ترد Fe/Ti است که بسیار ترد و شکننده بوده و موجب ترک پس از جوشکاری می‌شود [4].

Tomaschuk و همکاران [3] ورق‌های Ti-6Al-4V و AISI 316L به ضخامت 2میلی‌متر را با استفاده از لایه واسط مس به ضخامت 0/5 میلی‌متر به روش پرتو الکترونی و لیزر جوشکاری کردند.

سختی و استحکام جوش به ترتیب 400 Hv و 359 MPa گزارش گردید و در منطقه جوش فازهای TiFe و Ti-Cr نیز گزارش شد. Gao و همکاران [5] با استفاده از لایه واسط منیزیم دو ورق Ti-6Al-4V و304 AISI را با استفاده از دستگاه لیزر فیبری جوشکاری کردند.

اگر چه ترکیب بین فلزی Ti/SS مشاهده نشد اما ترکیبات بین فلزی و در مقطع جوش تیتانیم مشاهده شد و با افزایش توان لیزر بیش از 2/5 Kw شکست از مقطع جوش فولاد زنگ‌نزن به سمت تیتانیم جابجا و استحکام 221 MPa گزارش گردید.

Abeer A. Shehab و همکاران [6] در تحقیق دیگری ورق‌های تیتانیم گرید 2 به ضخامت 1 میلی‌متر و آلومینیم AA13105-O به ضخامت 0/5 میلی‌متر توسط لیزر پالس 400 وات جوشکاری شدند و به‌دلیل تفاوت ضریب هدایت حرارتی دو آلیاژ و حضور ترکیبات بین فلزی $TiAl_3$ و TiAl در منطقه جوش ترک مشاهده شد.

مرادی و همکاران [7] ورق‌های Ti-6Al-4V به ضخامت 1/7 میلی‌متر را با سرعت 6/6 mm/s و فشار گاز آرگون 0/1 بار با دستگاه جوش لیزر 400 وات جوشکاری کردند. سختی منطقه جوش 396 Hv گزارش شد و بهترین حالت جوشکاری در شرایطی که انرژی پالس 12 ژول، زمان روشنی پالس 6 ms و قله توان 2 کیلووات بدست آمد.

تیتانیم با برخی از فلزات مانند زیرکونیوم، نیوبیم، مولیبدن، تانتالیم، وانادیم و هافنیوم جوش‌پذیری خوبی دارد که البته همه گران قیمت هستند و فلزاتی مانند نقره، مس و نیکل نیز از پتانسیل خوبی به عنوان لایه واسط بین تیتانیم و فولاد زنگ‌نزن برخوردار هستند[7]. لذا در این تحقیق از دو فلز مس و نقره به‌عنوان لایه واسط استفاده شده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.3.4]

جدول 1- ترکیب شیمیایی AISI 304 بر حسب درصد وزنی.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
۰/۰۵	۰/٤٥	۰/۹٤	۱۸/۱۷	۸/۲۳	۰/۱٦	۰/۳	پایه

جدول 2- ترکیب شیمیایی Ti-6Al-4V بر حسب درصد وزنی.

Al	V	Cu	Fe	Mn	Ti
٦/٥۰	٤/۰٤	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۰۱	پایه

جدول 3- ترکیب شیمیایی مس و نقره بر حسب درصد وزنی.

Cu: ۹۹/۹	Co: ۰/۰۱
Ag> ۹۹/۹	

2- روش تحقیق

در تحقیق حاضر، ورق‌های تیتانیم Ti-6Al-4V و فولاد زنگ‌نزن AISI 304 به ضخامت 0/7 و 0/5 میلی‌متر به عنوان فلزات پایه و ورق‌های خالص مس و نقره با خلوص 99/9 درصد به ترتیب با ضخامت‌های 0/2 و 0/3 میلی‌متر به عنوان فلز واسط تهیه گردید. ترکیب شیمیایی نمونه‌ها که به روش اسپکتروگرافی نشر نوری تعیین شده است در جدول‌های (1 الی 3) ارائه شده است.

جهت انجام آزمایش‌ها نمونه‌هایی مطابق با استاندارد AWS C1-1 subsize طبق ابعاد جدول (4) برای هریک از آلیاژها آماده سازی شدند. برای عملیات جوشکاری از تکنیک جوشکاری نقطه‌ای دایره‌ای با نقاط هم مرکز به قطر 4 میلی‌متر مطابق شکل (2) استفاده شد [5 و 8] و عملیات جوشکاری با استفاده از یک دستگاه جوشکاری لیزر پالس Nd:YAG 400w با مشخصات ارائه شده در جدول (5) و شرایط جوشکاری ارایه شده در جدول(6 و7) انجام شد.

در ابتدا 12 نمونه شامل 6 نمونه با لایه واسط از جنس مس و 6 نمونه با لایه نقره و براساس تغییر در جانمایی فلز در معرض جوش، فلز واسط و پهنای پالس تحت جوشکاری قرار گرفتند. سپس با بررسی نمونه‌های 1 تا 12 مشخص شد هنگامی‌که فولاد زنگ نزن در معرض لیزر باشد، زمان 7 میلی ثانیه نفوذ بهتر و اتصال مناسب‌تری ایجاد کرده است و زمانی‌که تیتانیوم در معرض لیـزر قرار گرفت با زمان 5 میلی ثانیه نفوذ جوش مناسب‌تر بوده است. بنابر این با در نظرگرفتن موارد فوق طـراحی آزمـایـش‌ها را برای 4 حـالت و در هر حـالت 2 نمونه مشابه (در مجموع 8 نمونه) آماده سازی گردید و نمونه‌های 13 تا 20 در نظر گرفته شد. پارامترهای جوشکاری مطابق جدول(8) می‌باشد.

بعد از انجام آزمایش‌ها متعدد به تدریج مشخص شد که اتصال دو آلیاژ تیتانیم به فولاد زنگ نزن با توجه به پایین بودن ضریب هدایت حرارتی هر دو آلیاژ با یک نقطه جوش عموماً جوش مناسب و پر نفوذی ایجاد نمی‌کند و صرفاً موجب گرم شدن نمونه می‌گردد. اگر فلز رویی (در معرض لیزر) فولاد زنگ نزن باشد و بیش از یک پاس را در یک نقطه اعمال کنیم شرایط جوش بهتر می‌شود و اگر فلز رویی تیتانیم باشد به‌دلیل انتقال حرارت خیلی پایین منجر به سوراخ شدن آن می‌گردد. همچنین مشخص شد اگر نقطه جوش‌ها را متناوب نزدیک به یکدیگر اعمال کنیم برای نقاط دوم و سوم به بعد شرایط و کیفیت جوش به مراتب بهتر از پاس اول می‌باشد.

نمونه‌ها پس از عملیات جوشکاری ابتدا تحت بازرسی چشمی قرار گرفتند و بررسی مقطع اتصال به کمک میکروسکوپی نوری استریو(استریو میکروسکوپ) قرارگرفتند تا نمونه‌های فاقد عیب مشخص گردند سپس نمونه‌های فاقد عیب مجدد تحت آماده‌سازی سطوح (سنباده زنی) قرار گرفتند و بعد از پولیش با محلول سوسپانسیون آلومینایی3 میکرومتر با محلول تحت عملیات حکاکی قرار گرفته و به کمک یک دستگاه میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS تحت متالوگرافی نوری قرار گرفتند. همچنین جهت بررسی دقیق‌تر فازهای تشکیل شده در نمونه‌ها بررسی فازها توسط یک دستگاه میکروسکوپ

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.3.4]

الکترونی روبشی مدل VEGA\TESCAN-XMU-MIRA3 با ولتاژ 15 KV انجام شد.

جدول 4- ابعاد نمونه‌ها.

نام آلیاژ	ابعاد نمونه (mm)
AISI 304	٤٠× ٥ ×٠/٥
Ti-6Al-4V	٤٠×٥× ٠/٧
Cu	٥ ×٥ × ٠/٢
Ag	٥ × ٥× ٠/٣

جدول 5- مشخصات دستگاه جوش لیزر پالسی مورد استفاده در این تحقیق.

نوع دستگاه	۴۰۰ وات
توان ورودی	حداکثر ۱۰ کیلووات
توان متوسط	۴۰۰ وات
قله توان پالس	۷ کیلووات
طول موج	۱۰۶۴ نانومتر
پهنای پالس	۰/۲۵ تا ۲۰ میلی ثانیه(قابل تنظیم)
فرکانس	۱ تا ۲۰۰ هرتز
قطر باریکه	۰/۳ تا ۰/۶ میلیمتر
لامپ	زنون ۲ عدد
منبع تغذیه	۳ فاز ۳۸۰ ولت
سیستم خنک کننده	چیلر با آب خنک ساز

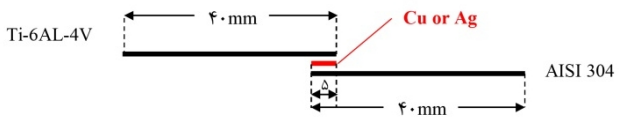
جدول 6- پارامترهای ثابت در عملیات جوشکاری

فرکانس	۱۵ هرتز
فشار گاز آرگون	۲ بار
شدت جریان	۱۵۰ آمپر
سرعت جوشکاری	۴/۶ میلیمتر/ثانیه
زمان جوشکاری سیکل	۲/۷ ثانیه
تعداد نقطه جوش در یک سیکل	۴۱ عدد
قطر دوایر هم مرکز	۴ میلیمتر
جهت حرکت جوشکاری	چپ به راست
قطر نقطه جوش	۰/۸ میلیمتر

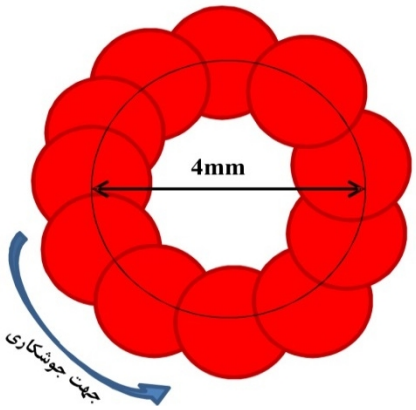
جدول 7- پارامترهای متغیر عملیات جوشکاری

فلز رویی یا در معرض لیزر	فولاد زنگ نزن یا تیتانیم
فلز واسط	مس یا نقره
پهنای پالس	۳-۵-۷ میلی ثانیه

آزمون سختی سنجی ویکرز (فقط بر روی نمونه‌های مورد تایید از بررسی چشمی) مطابق استاندارد ASTM E 384 و با بار 100 گرم نیرو و مدت زمان 15 ثانیه انجام شد. جهت انجام آزمون کشش از یک دستگاه کشش یونیورسال و مطابق استاندارد ASTM E8M (2016 a) استفاده شد و برای هر شرایط جوشکاری (مورد تایید از بررسی چشمی) 2 نمونه آزمون در اندازه کوچک با سرعت کشش 10 mm/min انجام شد.



شکل 1- آماده سازی نمونه



شکل 2- روش دایره‌ای

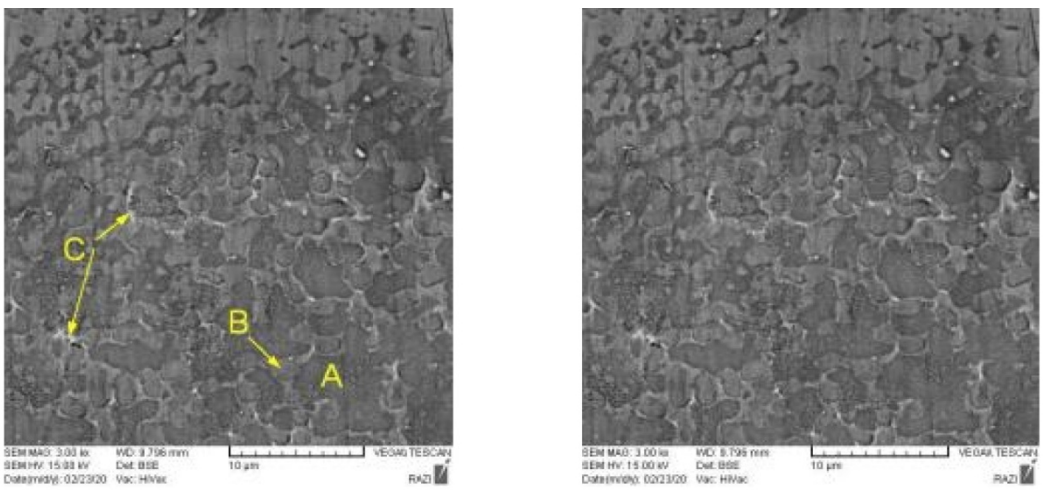
3- نتایج و بحث

جدول (9) نتایج جوشکاری و تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها را ارایه می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تصاویر نمونه‌های 1- 2- 5- 6- 7 از نفوذ جوش مناسب‌تری برخوردار هستند که شرایط جوش شامل پارامترهای جدول(10) می‌باشد و جدول(11) مقاطع نمونه‌ای جوشکاری شده 13 الی20 را نمایش می‌دهد. پارامترهای جوشکاری سه نمونه 13-14-18 که از نفوذ مناسب برخوردار هستند در جدول (12) ارائه شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نمونه شماره 13 در شکل (3) آمده است و تصاویر آنالیز صفحه‌ای منطقه جوش نمونه 13 (Map Scan) نیز در شکل (4) ارائه شده است. با بررسی تصویر (3) میکروسکوپ الکترونی (SEM) و آنالیز نقطه‌ای (EDS) در صد وزنی نقاط C, B, A نمونه شماره 13 مشخص است که در نقطه A فاز غالب تیتانیم است و آهن و مس تقریبا به یک اندازه حضور دارند و عمده فاز در این منطقه $FeTi_2$ می‌باشد (75%). در نقطه B فاز غالب آهن و تیتانیم است و 80% فاز را ترکیبات (FeTi) شامل می‌شود. اما در نقطه C فاز غالب مس است (42/80 درصد اتمی) که با رنگ روشن‌تر نمایان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.3.4]

جدول 8- پارامترهای روش جوشکاری

شماره نمونه	فلز رویی (بالا)	فلز واسط	$I_{(A)}$	t (m.s.)	P_{Ar} (bar)	f (Hz)	E (j)	M (Kw)	Q (w)
۱	تیتانیم	مس	۱۵۰	۵	۲	۱۵	۸	۱/۶	۱۲۰
۲	فولاد زنگ نزن	مس	۱۵۰	۵	۲	۱۵	۸	۱/۶	۱۲۰
۳	تیتانیم	مس	۱۵۰	۳	۲	۱۵	۵/۳	۱/۷	۸۰
۴	فولاد زنگ نزن	مس	۱۵۰	۳	۲	۱۵	۵/۳	۱/۷	۸۰
۵	تیتانیم	مس	۱۵۰	۷	۲	۱۵	۱۰/۷	۱/۵	۱۶۱
۶	فولاد زنگ نزن	مس	۱۵۰	۷	۲	۱۵	۱۰/۷	۱/۵	۱۶۱
۷	تیتانیم	نقره	۱۵۰	۷	۲	۱۵	۱۰/۷	۱/۵	۱۶۱
۸	فولاد زنگ نزن	نقره	۱۵۰	۷	۲	۱۵	۱۰/۷	۱/۵	۱۶۱
۹	تیتانیم	نقره	۱۵۰	۵	۲	۱۵	۸	۱/۶	۱۲۰
۱۰	فولاد زنگ نزن	نقره	۱۵۰	۵	۲	۱۵	۸	۱/۶	۱۲۰
۱۱	تیتانیم	نقره	۱۵۰	۳	۲	۱۵	۵/۳	۱/۷	۸۰
۱۲	فولاد زنگ نزن	نقره	۱۵۰	۳	۲	۱۵	۵/۳	۱/۷	۸۰
۱۳	فولاد زنگ نزن	مس	۱۵۰	۷	۲	۱۵	۱۰/۷	۱/۵	۱۶۱
۱۴	فولاد زنگ نزن	مس	۱۵۰	۷	۲	۱۵	۱۰/۷	۱/۵	۱۶۱
۱۵	فولاد زنگ نزن	نقره	۱۵۰	۷	۲	۱۵	۱۰/۷	۱/۵	۱۶۱
۱۶	فولاد زنگ نزن	نقره	۱۵۰	۷	۲	۱۵	۱۰/۷	۱/۵	۱۶۱
۱۷	تیتانیم	مس	۱۵۰	۵	۲	۱۵	۸	۱/۶	۱۲۰
۱۸	تیتانیم	مس	۱۵۰	۵	۲	۱۵	۸	۱/۶	۱۲۰
۱۹	تیتانیم	نقره	۱۵۰	۵	۲	۱۵	۸	۱/۶	۱۲۰
۲۰	تیتانیم	نقره	۱۵۰	۵	۲	۱۵	۸	۱/۶	۱۲۰



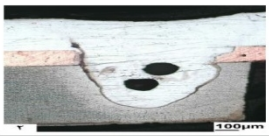
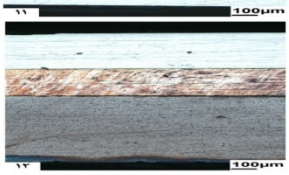
شکل 3- تصاویر SEM نمونه 13 - منطقه جوش

است و مرز دانه می‌باشد و فاز غالب TiCu است (85%) که در شبکه کریستالی‌اش انحلال آهن نیز وجود دارد. اندازه دانه‌های (A,B) بین 2 تا 3 میکرون می‌باشد و در آزمون استحکام کششی شکست از قسمت جوش/تیتانیم برای هر دو آزمون صورت گرفته است که به دلیل تردی بیشتر آن منطقه می‌باشد. در شکل (4) تصاویر آنالیز صفحه‌ای (Map Scan) فلزات مختلف به صورت رنگی در حالت مجزا و ترکیبی نمایش داده شده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.3.4]

جدول 9- تصاویر مقطع نمونه‌های جوشکاری شده 1 تا 12

شماره نمونه	شرایط جوشکاری			تصویر میکروسکوپی	توضیحات
	فلز رویی	فلز واسط	زمان (ms)		
۱	تیتانیم	مس	۵		نفوذ مناسب
۲	فولاد زنگ نزن	مس	۵		نفوذ مناسب + ۲ عدد حفره
۳	تیتانیم	مس	۳		عدم نفوذ
۴	فولاد زنگ نزن	مس	۳		عدم نفوذ
۵	تیتانیم	مس	۷		نفوذ مناسب
۶	فولاد زنگ نزن	مس	۷		نفوذ مناسب + ۲ عدد حفره
۷	تیتانیم	نقره	۷		نفوذ مناسب
۸	فولاد زنگ نزن	نقره	۷		عدم نفوذ
۹	تیتانیم	نقره	۵		نفوذ ناچیز
۱۰	فولاد زنگ نزن	نقره	۵		عدم نفوذ
۱۱	تیتانیم	نقره	۳		عدم نفوذ
۱۲	فولاد زنگ نزن	نقره	۳		عدم نفوذ

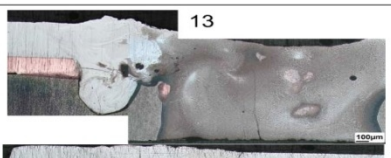
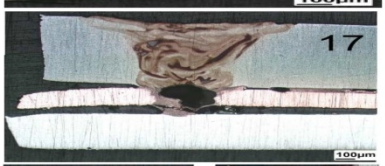
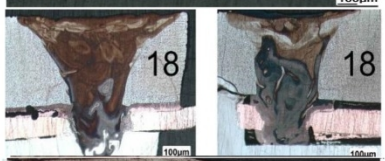
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.3.4]

جدول 10- مشخصات نمونه‌های مناسب

شماره نمونه	فلز رویی	فلز واسط	$t_{(ms)}$	$E_{(j)}$	نتیجه
۱	تیتانیم	مس	۵	۸	نفوذ مناسب
۲	فولاد زنگ نزن	مس	۵	۸	نفوذ مناسب و ۲ عدد حفره
۵	تیتانیم	مس	۷	۱۰/۷	نفوذ مناسب
۶	فولاد زنگ نزن	مس	۷	۱۰/۷	نفوذ مناسب و ۲ عدد حفره
۷	تیتانیم	نقره	۷	۱۰/۷	نفوذ مناسب

جدول 11- تصاویر مقطع نمونه‌های جوشکاری شده 13 الی 20

شماره نمونه	شرایط جوشکاری: فلز رویی	فلز واسط	زمان (ms)	تصویر میکروسکوپی	توضیحات
۱۳	فولاد زنگ نزن	مس	۷		نفوذ مناسب
۱۴	فولاد زنگ نزن	مس	۷		نفوذ مناسب + وجود حفره
۱۵	فولاد زنگ نزن	نقره	۷		عدم نفوذ
۱۶	فولاد زنگ نزن	نقره	۷		عدم نفوذ
۱۷	تیتانیم	مس	۵		نفوذ ناچیز
۱۸	تیتانیم	مس	۵		نفوذ مناسب
۱۹	تیتانیم	نقره	۵		عدم نفوذ
۲۰	تیتانیم	نقره	۵		عدم نفوذ

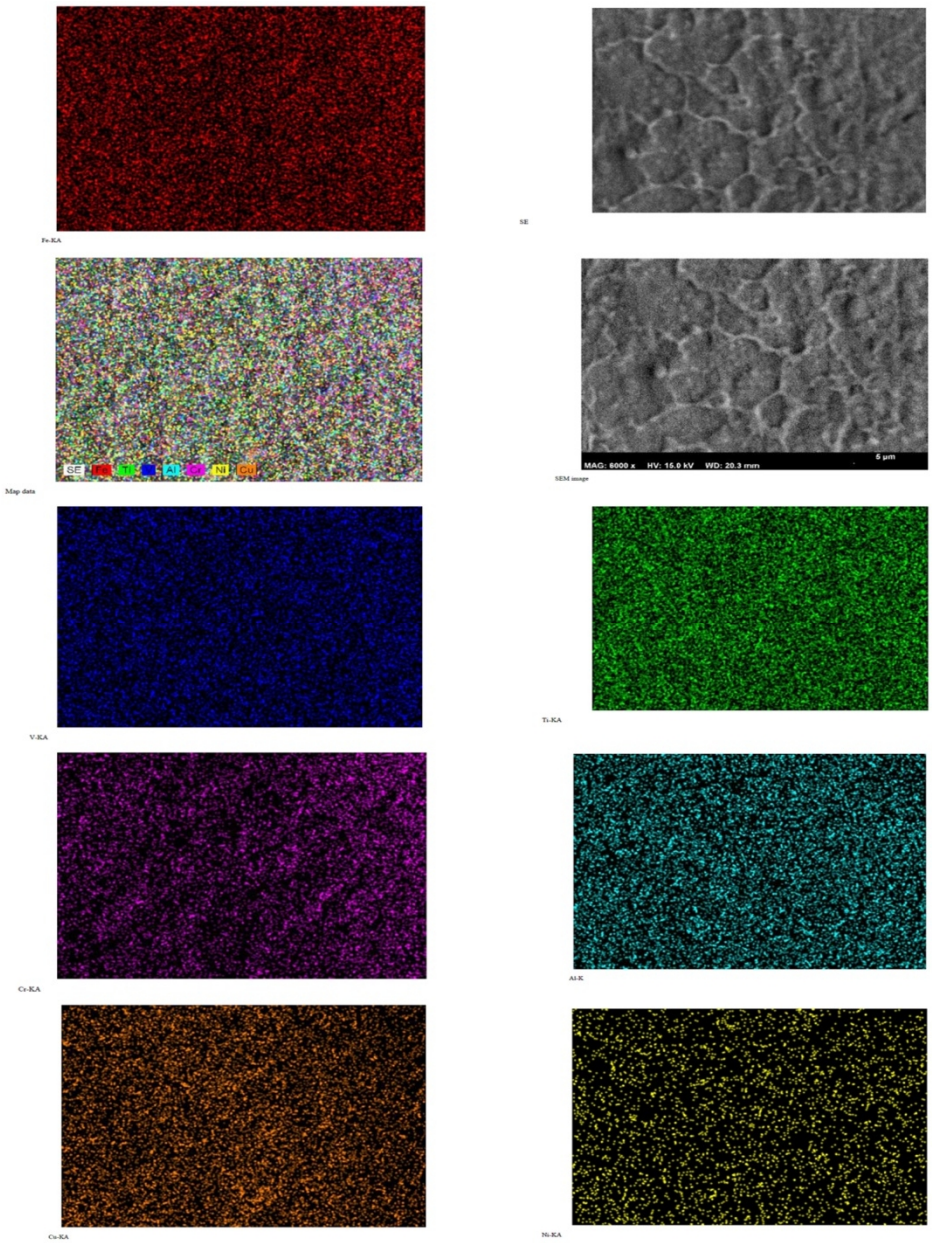
بهترین تصاویر که نفوذ مناسب داشته باشند مربوط به نمونه‌های 13-14-18 می‌باشد که در جدول (12) آمده است. همانطور که از نتایج و شرایط حالات جوشکاری مشخص می‌شود فلز رویی هم تیتانیم و هم فولاد زنگ نزن می‌باشد و فلز واسط هم با ورق مس و هم با ورق نقره به نفوذ مناسب رسیده است (البته تعداد حالات مناسب با ورق مس بیشتر است) اما زمان 5 و 7

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.3.4]

جدول 12- پارامترهای روش جوشکاری نمونه های 13-14-18.

شماره نمونه	فلز رویی	فلز واسط	t (ms)	I (A)	f (Hz)	P_{Ar} (Bar)	E (j)
۱۳	فولاد زنگ نزن	مس	۷	۱۵۰	۱۵	۲	۱۰/۷
۱۴	فولاد زنگ نزن	مس	۷	۱۵۰	۱۵	۲	۱۰/۷
۱۸	تیتانیم	مس	۵	۱۵۰	۱۵	۲	۸



شکل 4- تصاویر آنالیز صفحه ای منطقه جوش نمونه 13 (Map Scan).

میلی‌ثانیه می‌باشد. زمان 3 میلی‌ثانیه حذف گردیده است. در بررسی دو فلز مس و نقره مشخص شد که هر دو ساختار مکعب با سطوح مرکز دار دارند (F.C.C) و ضریب انتقال حرارت آن‌ها نزدیک بهم اما کمی متفاوت است (ضریب هدایت حرارتی مس و نقره به ترتیب w/m°k 429 و 399 است) [17]. اما تفاوت‌هایی نیز وجود دارد و آن اینکه: ضخامت ورق مس 0/2 میلی‌متر و ضخامت ورق نقره 0/3 میلی‌متر و البته هر دو از خلوص بالای 99/9% برخوردار هستند. ضمناً ضخامت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

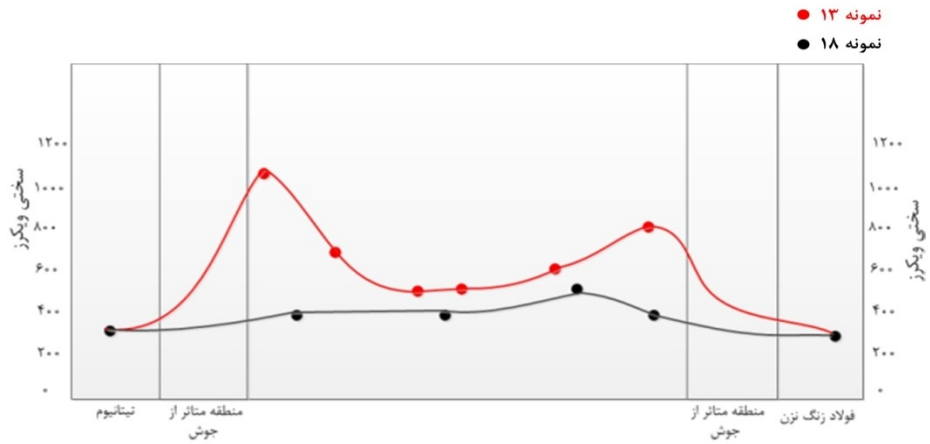
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.3.4]

جدول 13- درصد اتمی نقاط در منطقه جوش.

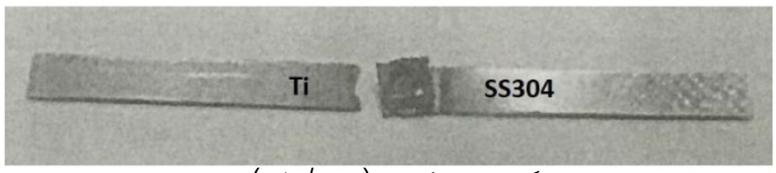
درصد اتمی / نقاط	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Cu	V	فاز موجود
A	۲/۲	۴۵/۷۵	۳/۰۶	۲۴/۷۰	۳/۶۴	۲۰/۶۵	--	$(FeTi_2)$ ٪۷۵
B	۳/۷۲	۳۶/۲۲	۱۲/۳۹	۴۰/۸۵	۱/۳۰	۴/۹۵	۰/۵۷	FeTi ٪۸۰
C	۶/۶۳	۲۸/۷۰	۶/۲۹	۱۴/۲۴	۰/۷۸	۴۲/۸۰	۰/۵۷	TiCu ٪۸۵

جدول 14- آزمون مکانیکی.

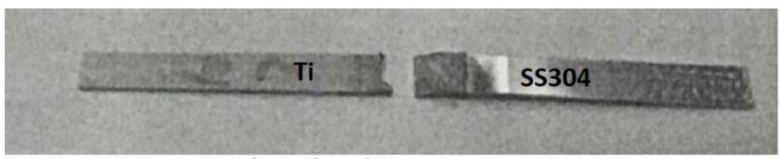
شماره نمونه	فلز رویی	فلز واسط	زمان (ms)	فرکانس (Hz)	فشار آرگون (bar)	Q (w)	M (Kw)	E (j)	سختی منطقه جوش (HV)	مقاومت برشی (MPa)	محل وقوع شکست در آزمون کشش
۱۳	فولاد زنگ نزن	مس	۷	۱۵	۲	۱۶۱	۱/۵	۱۰/۷	۵۰۴	۱۶۰	جوش / تیتانیم
۱۸	تیتانیم	مس	۵	۱۵	۲	۱۲۰	۱/۶	۸	۳۸۸	۹۶	جوش / تیتانیم



شکل 5- پروفیل سختی منطقه جوش نمونه‌های 13 و 18



شکست نمونه کششی (جوش/تیتانیم)
۱۰mm
شکل 6- آزمون کشش نمونه 18



شکست نمونه کششی (جوش/ تیتانیم)
۱۰mm
شکل 7- آزمون کشش نمونه 13

ورق فولاد زنگ نزن 0/5 میلی‌متر و ضخامت ورق تیتانیم 0/7 میلی‌متر است و همچنین ضریب هدایت حرارتی AISI 304 14w/m°k و برای Ti-6Al-4V نیز 6/7 w/m°k است [5و1]، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که چون هدایت حرارتی ورق تیتانیم تقریبا 40% فولاد زنگ نزن می‌باشد و از طرفی ضخامت ورق تیتانیم نیز 40% بیشتر از ورق فولاد زنگ نزن می‌باشد لذا زمانی‌که ورق فولاد زنگ نزن بالا و در معرض لیزر باشد هدایت حرارتی بهتری انجام می‌شود و حرارت ورودی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.3.4]

به راحتی به ورق مس و سپس تیتانیم منتقل می‌گردد. همینطور زمانی که تیتانیم بالا قرار گیرد (در معرض لیزر) افزایش زمان لیزر به دلیل هدایت حرارتی پایین این آلیاژ منجر به سوراخ شدن ورق تیتانیم می‌گردد.

نکته دیگر اینکه افزایش تعداد نقطه جوش‌ها موجب افزایش درجه حرارت پیش گرم ورق تیتانیم شده، مناطق کناری نقطه جوش اولیه را مستعد جوش مناسب و با نفوذ می‌کند. در بررسی مناطق فازی و تصاویر میکروسکوپی نوری جدول (12) مشخص شد که زمانی که فولاد زنگ نزن فلز رویی بود امتزاج فلزات (فولاد زنگ نزن، مس، تیتانیم) بهتر و پرنفوذ تر انجام می‌شود. همچنین دقت بیشتر در تصاویر میکروسکوپ نوری ما را به این نتیجه می‌رساند که اگر فولاد زنگ نزن در معرض جوش لیزر باشد زمان 7 میلی ثانیه و اگر تیتانیم بالا قرار گیرد زمان 5 میلی ثانیه نتایج بهتری می‌دهد.

پارامترهای‌جوشکاری‌نمونه‌های13و 18درجدول (14) و پروفیل سختی منطقه جوش نیز در شکل 5 آمده است.

از تصاویر آزمون کشش شکل (6و7) مشخص شد ناحیه شکست در این منطقه گردید. طبق تصاویر (6و7) آزمون کشش نمونه‌های 13 و 18 و همچنین پارامترهای آزمون مکانیکی (جدول 14) مشخص است لایه واسط مس برای هر دو فلز رویی (فولاد زنگ نزن یا تیتانیم) استحکام جوش و نفوذ مناسب تری را نسبت به لایه واسط نقره ایجاد کرده است. ضمناً زمانی که نمونه فولاد زنگ نزن در معرض لیزر بود سختی و مقاومت جوش منطقه جوش نیز بالاتر از زمانی بود که تیتانیم در معرض لیزر قرار گرفت. در تحلیل این موضوع و بررسی تصاویر آنالیز صفحه‌ای و نقطه‌ای مشخص است فاز مناسب در نمونه 13 نقاط سیاه‌رنگی است (نقطه A) که شامل ٪75 FeTi2 است و از سختی و مقاومت برشی بالایی برخوردار است (سختی 504 HV و مقاومت برشی 160MPa). این امر به‌دلیل انتقال حرارت بیشتر فولاد زنگ نزن (فلز رویی) است که حرارت به‌راحتی به ورق مس و سپس به تیتانیم منتقل و اتصال مناسب شکل گرفته است. اما در خصوص نمونه شماره 18 که در بهترین حالت برای تیتانیم به عنوان فلز رویی بوده است سختی 388 HV و مقاومت برشی نیز 96 MPa بدست آمد. دلیل این امر ابتدا ضریب هدایت حرارتی پایین‌تر تیتانیم نسبت به فولاد زنگ نزن می‌باشد و دوم ضخیم‌تر بودن ورق تیتانیم (ضخامت ورق تیتانیم 0/7 میلی‌متر و ورق فولاد زنگ‌نزن 0/5 میلی‌متر) است. در خصوص محل وقوع شکست نمونه‌های 13 و 18 طبق جدول (14) و شکل‌های(6و7) مشخص است که از قسمت جوش/ تیتانیم شکست صورت گرفته است. در هر 2 نمونه که ناشی از سختی و تردی بالاتر ناحیه اتصال تیتانیم به فلز واسط مس می‌باشد.

همانطور که در شکل (5) رویت می‌شود سختی منطقه متاثر از جوش در قسمت تیتانیم 1000 HV اما در قسمت فولاد زنگ‌نزن 700 HV می‌باشد و هر دو نمونه از قسمت جوش/ تیتانیم شکست حاصل شده است.

4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با عنوان تأثیر متغیرهای جوشکاری لیزر نقطه‌ای بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال غیر هم‌جنس Ti-6Al-4V به AISI 304 بررسی صورت گرفت و نتایج ذیل حاصل گردید:

- اتصال دو آلیاژ Ti-6Al-4V و AISI 304 به روش جوش لیزر نقطه‌ای بدون فلز واسط قابل انجام نمی‌باشد و خواص مکانیکی جوش با لایه واسط از جنس مس به مراتب بهتر از نقره است.
- جوش لیزر نقطه ای دو آلیاژ مذکور به صورت تک پاس و یا حتی چند پاس روی هم نتیجه‌بخش نمی‌شود و از آنجایی که ضریب هدایت حرارتی هر دو آلیاژ پایین است روش اجرایی انجام شده به صورت نقطه جوش‌های همجوار می‌باشد که در این تحقیق صورت گرفت و نتیجه‌بخش بود.
- در خصوص اتصال دو فلز غیر هم‌جنس که ضرایب هدایت حرارتی متفاوت دارند استفاده از روش جوش لیزر نقطه‌ای دایره‌ای موجب پیش‌گرم شدن فلز پایه می‌شود و اتصال را ممکن می‌سازد.
- از آنجایی‌که ضریب هدایت حرارتی‌آلیاژ تیتـانیمTi-6Al-4V

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.3.4]

برابر با 6/7 w/m°k و برای فولاد زنگ نزن 304 برابر با 14 w/m°k می‌باشد. بنابر این در نمونه‌ای که فولاد زنگ نزن در معرض لیزر قرار گرفت اتصال پرنفوذ، مستحکم و ریزساختار متقارن تر بود.

- در عملیات جوش لیزر نقطه ای بین دو آلیاژ Ti-6Al-4V و AISI 304 استفاده از لایه واسط مس به ضخامت 0/2 میلی‌متر کیفیت جوش بهتری نسبت به لایه واسط نقره به ضخامت 0/3 میلی‌متر ایجاد کرد.

منابع

[1] TWI: Welding Titanium "The Titanium Information Group", 1999.

[2] L. Tomashchuk, P. Sallamand, H. Andrzejewski, D. Grevey, "the formation of intermetallies in dissimilar Ti-6AL-4V /cooper/AISI 715L electron beam and Nd:YAG laser joints", ELSEVIER, 19(2011)1466-1473.

[3] S.T. Avwal, S. Ramesh, F. Yusof, S.M. Manladan, "A review on laser beam welding of titanium alloys", The international Journal of advanced manufacturing technology, April 2018.

[4] M. Gao, S.W. Mei, Z. M. Wang, "Characterisation of laser welded dissimilar Ti/steel joint using Mg interlayer"; Science and Technology of welding and joining, Volume 17, 2012- Issue 4.

[5] "Handhook of stainless steel", outokupu, Sweden, 2013.

[6] Abeer, A. Shehab, S.K. Sadrnezhaad, M.J. Torkamany, M. Fakouri Hassanabadi, Muhaed Alali, A.K. Mahmoud, Mohammad H. Abass, M.H. Kokabi, "Ring like laser spot welding of Ti grade 2 to AA13105-0 using AlSiMg filler metal, ELSEVIER, Volume 206, March 2020, 163630.

[7] محمود مرادی، هادی عبداللهی، شیرین شکوهی، محمدجواد ترکمنی، بررسی پارامترهای موثر در جوشکاری لیزرNd:YAG، آلیاژ Ti6-4 دومین همایش مهندسی مواد، ایـران، 1393.

[8] M. Masoumi, S.P.H. Marashi, M. Pouranvari, J. Sabbaghzadeh, M.J. Torkamany, "Assessment of the Effect Of Laser Spot Welding Parameters On The Joint Quality Using Taghuchi Method", Amirkabir University of Technology, IRAN, Metal 2009, 19-21-5, 2009 Hiradec nad Morarico.

[9] AMADA, "Laser welding fundamentals", www.amadaweldtech.com, 2020

[10] Xinxue, Antonio Peteria, Gabriela Vincce, Xinyong Wu, and Juan Liao", Interfacial characteristics of dissimilar Ti-6AL-4V / AA6060 Lap joint by pulsed Nd: YAG laser welding", Portugal 2019.

[11] Abdel-Monem el Bataghy, Abdel-Fattah Khourshid, Thoria Sharef, "Effect of laser beam welding parameters on Microstructure and properties of Duplex stainless steel", Materials Sciences and applications, 2011, 2, 1443-1451.

[12] Peter Stritt, Christian Hagenlocher, Christine Xizler, Rudolf weber, Christoph Rüttmann, Thomas Graf, "Laser spot welding of Copper-aluminum joints using pulsed dual wavelength at 532 and 1064 nm", ELSEVIER, Physics procedia, 8th international conference of Photonic Technologies LANE 2014.

[13] M.J. Torkamany, S. Tahmtan, J. Sabbaghzadeh, "Dissimilar Welding of Carbon Steel to 5754 Aluminum Alloy by Nd: YAG Pulsed Laser", ELSEVIER:31(2010) 458-465, IRAN.

[14] Thaier A. Tawfiq, Ziad A. Taha, Furat S. Hussein and Abeer a. Shehab, "Spot welding of dissimilar metals using an Automated Nd:YAG Laser system", Iraqi Journal of Laser, Vol. 11, pp. 1-5 (2012).

[15] M. Theron, C. van Rooyen, L.H. Ivanchev, "CW Nd:YAG Laser Welding of Dissimiur Sheet Metals", Pretoria, South Africa, 2007.

[16] M.J. Torkamany, J. Sabbaghzadeh, M.J. Hamedi, "Effeet of laser welding mode on the microstructure and mechanical performance of dissimilar laser spot welds between low carbon and austenitic stainless steels, ELSEVIER, 34(2012) 666-672.

[17] www.tibtech.com, Conductivity, Metals Properties Comparison: Electric Conductivity.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.3.4]