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

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

Volume 9, Number 1, 2023



Electron beam welding of 17-4PH steel and Ti6Al4V alloy with copper interlayer

A. Mahdavi Shaker, H. Momeni, A.Khorram*, A. Yazdipour
Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Received 14 January 2023 ; Accepted 2 May 2023

Abstract

This study aimed to investigate the effect of electron beam welding parameters on the microstructural characteristics and mechanical properties of the dissimilar joint between 17-4PH stainless steel and Ti6Al4V alloy. For this purpose, the welding of these two alloys was performed with an copper interlayer with a thickness of 1 mm. Two different welding speeds of 0.7 and 0.9 m/min with four levels of beam offset (0, 0.2, 0.4 and 0.6 mm) from the center of the interlayer towards the steel were used to accomplish the experiments. The results show that by using the copper interlayer with thickness of 1 mm, the cracks caused by the formation of intermetallic compounds are removed from the weld pool. At the interface between the titanium and the weld pool, at the beam offset of 0 and 0.2 mm, a solid solution of copper and $TiCu_2$ intermetallic compounds is formed, while at the beam offset of 0.4 and 0.6 mm, a solid solution of copper and TiCu intermetallic compounds is formed. The weld pool, at the beam offset of 0 and 0.2 mm, consists of $TiCr_2$+$TiFe_2$ intermetallic compounds while at the beam offset of 0.4 and 0.6 mm, solid solution of iron (α-Fe), solid solution of copper and TiCu intermetallic compounds are formed. The highest value of hardness is observed at the interface between the weld pool and the titanium alloy, as well as at the interface between the weld pool and the steel, which is due to the presence of intermetallic compounds with high hardness in these regions. By increasing the welding speed and the beam offset, the hardness value decreases, which is due to the reduction of brittle intermetallic compounds in the joint structure. By increasing the beam offset from 0.4 mm to 0.6 mm at the speed of 0.7 m/min, the shear strength increases from 180 MPa to 210 MPa and at the speed of 0.9 m/min, the shear strength raises from 230 MPa to 250 MPa. The welded sample with the welding speed of 0.9 m/min and the beam offset of 0.6 mm has the highest shear strength equal to 250 MPa. The failure in all samples happened at the interface between the weld pool and the titanium alloy, which shows that the weakest region in the joint is this interface.

Keywords: Electon Beam Welding; Ti6Al4V alloy; 17-4PH Steel; Cu interlayer; Microstructure; Mechanical properties.

Corresponding Author: a_khorram@mut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره1، بهار و تابستان 1402



جوشکاری پرتو الکترونی آلیاژ Ti-6Al-4V به فولاد زنگ‌نزن 17-4PH با استفاده از لایه میانی مس

علی مهدوی شاکر، حسین مومنی، علی خرّم*، علیرضا یزدی پور

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران.

دریافت مقاله: 1401/10/24 ؛ پذیرش مقاله: 1402/02/12

چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری پرتو الکترونی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس فولاد زنگ‌نزن 17-4PH و آلیاژ Ti-6Al-4V می‌باشد. برای این منظور، جوشکاری این دو آلیاژ با لایه میانی مس با ضخامت 1 میلی‌متر انجام شد. دو سرعت جوشکاری مختلف 0/7 و 0/9 متر بر دقیقه با چهار میزان انحراف پرتو (0، 0/2، 0/4 و 0/6 میلی‌متر) از مرکز لایه میانی به سمت فولاد برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از لایه میانی مس با ضخامت1 میلی‌متر، ترک‌های ناشی از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی از حوضچه جوش حذف می‌شوند. در فصل مشترک بین تیتانیوم و حوضچه جوش در انحراف پرتوهای 0 و 0/2 میلی‌متر، محلول جامد مس و ترکیبات بین‌فلزی $TiCu_2$ و در انحراف پرتوهای 0/4 و 0/6 میلی‌متر، محلول جامد مس و ترکیبات بین‌فلزی TiCu تشکیل می‌شود. در ناحیه حوضچه جوش در انحراف پرتوهای 0 و 0/2 میلی‌متر، ترکیبات بین‌فلزی $TiCr_2$+$TiFe_2$ و در انحراف 0/4 و 0/6 میلی‌متر، محلول جامد آهن (α-Fe)، محلول جامد مس و ترکیبات بین‌فلزی TiCu تشکیل می‌شوند. بیشترین میزان سختی در فصل مشترک حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم و همچنین در سطح مشترک حوضچه جوش و فولاد مشاهده می‌شود که به سبب حضور ترکیبات بین فلزی با سختی بالا در این مناطق می‌باشد. با افزایش سرعت جوشکاری و میزان انحراف پرتو، میزان سختی کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده در ساختار اتصال می‌باشد. با افزایش میزان انحراف پرتو از 0/4 میلی‌متر به 0/6 میلی‌متر در سرعت 0/7 متر بر دقیقه، استحکام برشی اتصال از 180 مگاپاسکال به 210 مگاپاسکال و در سرعت 0/9 متر بر دقیقه، استحکام برشی اتصال از 230 مگاپاسکال به 250 مگاپاسکال افزایش می‌یابد. نمونه جوشکاری شده با سرعت جوشکاری 0/9 متر بردقیقه و میزان انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر دارای بیشترین استحکام برشی معادل 250 مگاپاسکال می‌باشد. شکست در تمامی نمونه‌ها در فصل مشترک بین حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم اتفاق می‌افتاد که نشان می‌دهد ضعیف‌ترین ناحیه در اتصال، این فصل مشترک می‌باشد.

کلمات کلیدی: جوشکاری پرتو الکترونی، آلیاژ Ti-6Al-4V ، فولاد زنگ‌نزن 17-4PH، لایه میانی مس، ریزساختار، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: a_khorram@mut.ac.ir

1- مقدمه

در سال‌های اخیر با پیشرفت فناوری و توسعه ساخت قطعات، ماشین‌آلات و تجهیزات جدید و پیشرفته، نیاز به بکارگیری مواد با قابلیت‌ها و ویژگی‌های متفاوت در صنایعی مانند هسته‌ای، هوافضا و شیمیایی مطرح شده است. قابلیت‌هایی نظیر سبک بودن، استحکام مناسب، مقاومت به خوردگی، قیمت ارزان و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]

سهولت در ماشین‌کاری از جمله ویژگی‌هایی هستند کـه امکـان تجمیع آن‌ها در یک ماده میسر نمی‌باشد [1].

آلیاژهای تیتانیوم به علت خواص خوب مکانیکی و متالورژیکی در صنایع هوافضا و موتورهای توربینی مورد استفاده قرار می‌گیرند.آلیاژهای تیتانیوم مورداستفاده برای کاربردهای سازه‌ای معمولاً آلیاژهای دوفاز (α+β) می‌باشند.آلیاژ Ti-6Al-4V، با شش درصد وزنی آلومینیوم به عنوان تثبیت کننده فاز α و چهار درصد وزنی وانادیوم به عنوان تثبیت کننده فاز β، به تغییرات ریزساختاری حساس می‌باشد [2].

فولاد17-4PHیک فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت‌شونده مارتنزیتی می‌باشد. استحکام بالا، مقاومت به خوردگی عالی و عملیات حرارتی نسبتاً ساده باعث شده تا فولاد زنگ نزن 17-4PH کاربرد گسترده‌ای در نیروگاه‌های هسته‌ای، صنایع دریایی و هوافضا داشته باشد [3].

مشکلات مربوط به جوشکاری غیر هم جنس فولاد رسوب سخت شونده 17-4PH و آلیاژTi-6Al-4V، استفاده گسترده از این آلیاژها را محدود ساخته است. مشکلات در جوشکاری مواد غیرهم‌جنس از اختلاف خواص فیزیکی، شیمیایی و متالورژیکی بین دو جزء اتصال و تشکیل احتمالی فاز بین‌فلزی ترد و شکننده و درنتیجه کاهش خواص مکانیکی جوش به وجود می‌آید [2و3].

جوشکاری پرتو الکترونی یک فرایند اتصال ذوبی می‌باشد. در این فرایند، قطعه کار توسط جریان متراکم الکترون‌های دارای سرعت بالا بمباران شده و کل انرژی جنبشی الکترون‌ها، در اثر برخورد با قطعه کار به حرارت تبدیل می‌شود. این حرارت موجب ذوب لبه‌های قطعات و اتصال دو قطعه پس از انجماد می‌شود. این فرایند دارای مزایایی همچون چگالی انرژی بالا، اتمسفر خلاء، پرتو متمرکز، ناحیه متأثر از حرارت کوچک و سرعت بالای جوشکاری می‌باشد [4و5].

وانگ و همکاران [6] تیتانیوم TA15 و فولاد زنگ نزن 304 را با استفاده از پرتوی الکترونی به یکدیگر متصل نمودند و تاثیر مواد پرکننده متفاوت (وانادیوم، نیکل و مس) را بر کیفیت اتصال مطالعه نمودند.

نتایج نشان می‌دهد که تمام این مواد پرکننده در جلوگیری از تشکیل ترکیبات بین فلزی TiFe موثر می‌باشند. در اتصالات جوشکاری شده با مواد پرکننده وانادیوم، نیکل و مس به ترتیب ترکیبات بین‌فلزی $Cu_2Ti+CuTi+CuTi_2$و$TiFe$،$Fe_2Ti+Ni_3Ti+NiTi_2$ مشاهده می‌شوند.

آدوماکو و همکاران [7] از روش‌های جوشکاری پرتو الکترونی، جوشکاری لیزری پیوسته و جوشکاری لیزری پالسی برای اتصال آلیاژ Ti-6Al-4V و فولاد زنگ‌نزن 17-4PH با لایه میانی وانادیوم استفاده کردند و ریزساختار و خواص مکانیکی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه جوشکاری شده با روش لیزری پالسی، ناحیه ترک در سطح مشترک فولاد- وانادیوم وجود دارد. جوشکاری پرتو الکترونی یک اتصال سالم و بدون عیب را ایجاد می‌کند و شکست در لایه میانی وانادیوم رخ می‌دهد. وانادیوم اتصال مناسبی با تیتانیوم ایجاد می‌کند و در منطقه جوش نزدیک تیتانیوم، محلول جامد (βTi,V) مشاهده می‌شود. در منطقه جوش نزدیک فولاد، فازهای مشابه ((Fe,V)ss) با ترکیبات مختلف دیده می‌شود.

تینگ‌وهمکاران[8]جوشکاری‌غیرهم‌جنس‌آلیاژ $Ti_6Al_2Mo_2V_2Zr$ و فولاد زنگ‌نزن 304 را بدون لایه میانی مس و با استفاده از لایه میانی مس بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های بدون لایه میانی به سرعت بعد از جوشکاری از هم‌گسیخته شدند زیرا ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده با سختی بالا مانند TiFeو $TiFe(Cr)_2$ به طور پیوسته در ساختار جوش توزیع شده‌اند. یک اتصال بدون ترک با روش جوشکاری پرتو الکترونی با کمک لایه میانی مس به دست آمد. در این اتصال منطقه جوش شامل یک محلول جامد نرم مس با ترکیبات بین فلزی پراکنده TiFe بود. مرز مشترک بین جوش و آلیاژ تیتانیوم از یک لایه بین فلزی نسبتاً نرم Ti- Cu با سختی کمتر تشکیل شده بود. استحکام کششی نمونه جوشکاری شده با لایه میانی مس،310 مگا پاسکال بود که 61 درصد استحکام فولاد زنگ‌نزن 304 می باشد.

تینگ و همکاران [9] در تحقیقی دیگر، جوشکاری غیرهمجنس آلیاژ Ti-15-3 و فولاد زنگ نزن 304 را بدون لایه میانی و با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]

لایه میانی مس بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که ورق‌های فولاد زنگ نزن و آلیاژ تیتانیوم نمی‌توانند با روش جوشکاری پرتوالکترونی بدون استفاده از لایه میانی مس جوش داده شوند. هنگامی که از لایه میانی‌مس‌استفاده نمی‌شود ترکیبات بین فلزی Ti-Fe به طور پیوسته در حوضچه جوش توزیع می‌شوند که باعث تردی زیاد اتصال می‌شوند به طوری‌که اتصال تحت تنش نسبتا کم ترک می‌خورد. هنگامی‌که از یک لایه میانی مس استفاده می‌شود مناطق داخل جوش و نزدیک فولاد، از محلول جامد مس و ترکیبات بین فلزی $TiFe_2$ که به طور یکنواخت در آن توزیع شده است تشکیل می گردد. این ساختار منجر به یک اتصال بدون ترک می‌شود. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزودن عنصر مس در جوش می‌تواند وضعیت متالورژی اتصال، انعطاف پذیری و چقرمگی اتصال را بهبود بخشد.

وانگ و همکاران [10] از روش جوشکاری پرتو الکترونی برای اتصال تیتانیوم Ti-6-2-2 و فولاد زنگ نزن 304 با لایه میانی کامپوزیتی V/Cu-V استفاده نمودند. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از این لایه میانی کامپوزیتی، ترکیبات بین فلزی شکننده در اتصال به طور کامل حذف می شوند و در نمونه جوشکاری شده، استحکام کششی 395 مگاپاسکال به دست می‌آید که 72 درصد استحکام فولاد زنگ نزن 304 می باشد.

توماش چوکو و همکاران [11] ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال بین آلیاژ Ti-6Al-4V و فولاد زنگ‌نزن 316L را با لایه میانی مس مطالعه نمودند. آن‌ها دریافتند که دو مورفولوژی متفاوت با توجه به انحراف پرتو از خط جوش می‌تواند به دست آید. انحراف پرتو به سمت تیتانیوم منجر به تشکیل مقدار قابل توجهی فاز $TiFe_2$ می‌شود. انحراف پرتو به سمت فولاد از ذوب تیتانیوم و تشکیل ترکیبات بین فلزی شکننده در سطح مشترک تیتانیوم- منطقه مذاب جلوگیری می‌کند. استحکام اتصال به میزان ترکیبات بین فلزی بستگی دارد. بالاترین مقادیر استحکام نهایی (340-350 مگا پاسکال) برای جابجایی پرتو 0/25 - 0/5 میلی‌متر و برای سرعت جوشکاری 1/8 متر در دقیقه به دست آمد.

توماش چوکو و همکاران [12] در تحقیقی دیگر، تشکیل ترکیبات بین فلزی در اتصال غیرهمجنس بین آلیاژ Ti-6Al-4V و فولاد زنگ‌نزن 316L را با لایه میانی مس مطالعه نمودند. آن‌ها دریافتند که افزودن لایه میانی مس با ضخامت 500 میکرون می‌تواند تشکیل ترکیبات بین فلزی را کاهش دهد. ترکیبات بین فلزی Cu-Ti و Cu-Fe-Ti باعث کاهش کمتر استحکام اتصال نسبت به نمونه بدون لایه میانی می‌شوند. استحکام کششی اتصال به شکنندگی لایه α-Ti، FeTi و $CuTi_2$ نزدیک تیتانیوم محدود می‌شود.

اتصال غیرمستقیم با افزودن یک لایه میانی فلزی مانند نیکل، نقره و مس برای جلوگیری از نفوذ اتمی بین تیتانیوم و آهن، کروم یا نیکل انجام می‌شود. از میان مواد پرکننده متفاوت، اغلب ماده پرکننده مس استفاده می‌شود زیرا مس ترکیبات بین فلزی شکننده با آهن، نیکل،کروم و کرین تولید نمی‌کند. همچنین مس یک فلز نرم می‌باشد که می‌تواند به راحتی تغییر فرم دهد و تنش‌های ایجاد شده به وسیله عدم تطابق انبساط خطی را آزاد می‌کند [8] .

در پژوهش قبلی [13] مشاهده گردید که در اتصالات ایجادشده با لایه میانی مس با ضخامت 0/8 میلی‌متر، ترکیبات بین‌فلزی به طور کامل از منطقه حوضچه جوش حذف نشده‌اند و درصد وزنی عنصر مس در حوضچه جوش پایین می‌باشد.

ازاین‌رو، در این پژوهش، جوشکاری پرتو الکترونی فولاد رسوب سخت شونده 17-4PH و آلیاژ Ti-6Al-4V با لایه میانی مس با ضخامت 1 میلی‌متر انجام پذیرفت. سه متغیر اصلی (آمپر، ولتاژ، سرعت) در جوشکاری پرتو الکترونی وجود دارد که در این تحقیق آمپر و ولتاژ به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته‌شدند.

سرعت جوشکاری (0/7 و 0/9 میلی‌متر بر دقیقه) و میزان انحراف پرتو (0، 0/2، 0/4 و 0/6 میلی‌متر) از مرکز لایه میانی به سمت فولاد به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته‌شدند و مقدار بهینه این متغیرها استخراج شد. روش‌های میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش اشعه ایکس،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]

سختی‌سنجی و آزمون برش جهت ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی مورد استفاده قرار گرفتند.

2- انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق یک میلگرد آلیاژ Ti-6Al-4V به قطر 32 میلی‌متر به‌صورت آنیل انحلالی و یک میلگرد فولاد رسوب سخت شونده 17-4PH به قطر 32 میلی‌متر به‌صورت آنیل شده تهیه شد. 16 نمونه به طول 30 میلی‌متر توسط دستگاه وایرکات از هر یک از مواد اولیه بریده شد. در جداول 1و2 ترکیب شیمیایی این آلیاژها ارائه شده است. از مس خالص الکترولیتی(OFC) به‌صورت آنیل با ضخامت 1 میلی‌متر به‌عنوان لایه واسط (مطابق با استاندارد AMS 4500) استفاده‌شد.

جدول 1-آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه آلیاژ Ti-6Al-4V.

Al	V	Fe	O	C	Ti
6/4	3/5	0/3	0/2	0/1	balanced

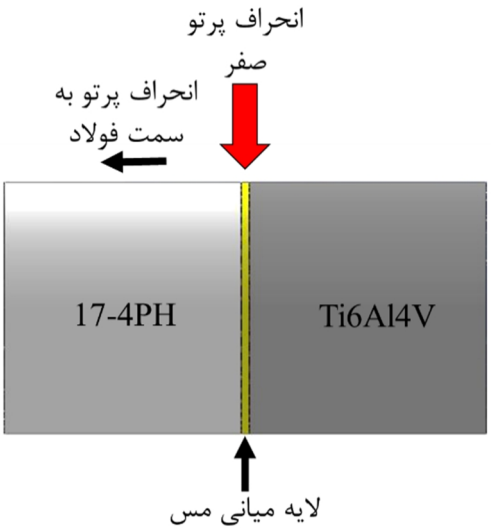
جدول 2-آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه فولاد رسوب سخت شونده 17-4PH.

Fe	Cr	Ni	P	Si
Balanced	16/5	4/2	0/03	0/93
C	S	Cu	Mn	
0/07	0/02	4/12	0/82	

بعد از انجام برشکاری و آماده‌سازی نمونه‌های اولیه، لایه‌های اکسیدی موجود بر روی سطح نمونه‌های در معرض اتصال، توسط سمباده زنی ظریف حذف گردید. نمونه‌های تیتانیومی با محلول (MEK) و نمونه‌های فولادی و لایه واسط مس با محلول استون به‌طور کامل شستشو و چربی زدایی شدند. نمونه‌های فولادی و فیکسچر جهت جوشکاری مغناطیس‌زدایی شدند.

از دستگاه جوشکاری پرتو الکترونی با توان 15 کیلووات با حداکثر جریان 250 میلی‌آمپر و ولتاژ 60 کیلوولت برای اتصال‌دهی قطعات استفاده‌شد. مقدار خلأ قابل ایجاد در محفظه جوشکاری و محفظه تفنگ الکترونی حدود 5×10^{-5} میلی بار می‌باشد.

در این تحقیق آمپر، ولتاژ، فاصله منبع پرتو تا قطعه کار و ضخامت لایه میانی (1 میلی‌متر) به‌عنوان پارامترهای ثابت و سرعت جوشکاری (0/7 و 0/9 متر بر دقیقه) و انحراف پرتو به سمت فولاد (0، 0/2، 0/4 و 0/6 میلی‌متر) به‌عنوان پارامترهای متغیر انتخاب‌شده‌اند. در شکل (1) شماتیک طرح اتصال و نحوه اعمال انحراف پرتو نشان داده شده است.



شکل1- شماتیک طرح اتصال و نحوه اعمال انحراف پرتو.

انرژی ورودی به قطعه کار در طول جوشکاری پرتو الکترونی معمولاً بر حسب ژول بر ثانیه بیان می شود. از فرمول (1) می‌توان برای محاسبه انرژی ورودی به قطعه کار استفاده نمود [14].

$$\text{Energy Input} = \frac{E \times I}{S} \quad (1)$$

در این فرمول E ولتاژ شتاب دهی به پرتو بر حسب ولت، I جریان پرتو برحسب آمپر و S سرعت جوشکاری برحسب میلی‌متر بر ثانیه می باشند. در جدول (3) پارامترهای تنظیم شده برای آزمایش و میزان انرژی ورودی محاسبه شده ارائه شده است.

بعد از انجام جوشکاری به‌منظور بررسی ریزساختار و فازهای تشکیل‌شده، سطح مقطع نمونه‌ها در راستای طولی توسط وایرکات برش داده شد. بعد از انجام مراحل آماده سازی نمونه‌ها، هر یک از فلزات پایه به‌صورت جداگانه اچ شدند. به همین منظور برای اچ آلیاژ تیتانیوم Ti_6Al-4V از محلول $22H_2O$-$2HNO_3$-1HF به مدت‌زمان 40 ثانیه و نیز برای اچ

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]

فولاد17-4PH از محلول $3HCl-1HNO_3$ به مدت‌زمان 100 ثانیه استفاده شد. برای بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی Vega/Tescan مجهز به EDS با حداکثر بزرگنمایی 50000 برابر استفاده شد. سطوح اتصال با به‌کارگیری کنتراست الکترون‌های برگشتی مورد مطالعه قرار گرفتند. برای بررسی آنالیز فازهای موجود در ریزساختار از دستگاه پراش اشعه ایکس مدل Equinox 6000 ساخت شرکت INEL با چشمه مس استفاده شد. جهت تفسیر و تعیین پیک‌های طیف از اطلاعات نرم‌افزار Xpert استفاده گردید.

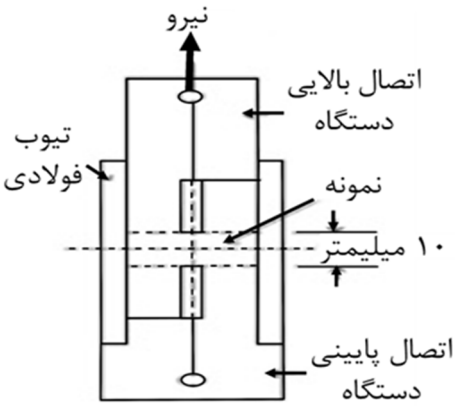
جدول 3- تنظیمات آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش و میزان انرژی ورودی محاسبه شده

نمونه	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	سرعت (متر بر دقیقه)	انحراف پرتو(میلی‌متر)	انرژی ورودی (ژول بر میلی‌متر)
1	0/250	6×10^4	0/7	0	1285/3
2	0/250	6×10^4	0/7	0/2	1285/3
3	0/250	6×10^4	0/7	0/4	1285/3
4	0/250	6×10^4	0/7	0/6	1285/3
5	0/250	6×10^4	0/9	0	1000
6	0/250	6×10^4	0/9	0/2	1000
7	0/250	6×10^4	0/9	0/4	1000
8	0/250	6×10^4	0/9	0/6	1000

سختی منطقه اتصال توسط دستگاه میکرو سختی سنجی مدل Easy way بر مبنای ویکرز اندازه‌گیری شد. برای این منظور فرورونده‌ای از جنس الماس با بار اعمالی 25 گرم و زمان 25 الی 30 ثانیه طبق استاندارد ASTM E384-05 مورد استفاده قرار گرفت.

برای بررسی استحکام اتصال از آزمون برش استفاده گردید. از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده استحکام اتصال‌های ایجادشده به روش جوشکاری پرتو الکترونی، ترک‌های باقی‌مانده در فصل مشترک اتصال و همچنین میزان ترکیبات بین‌فلزی باقی‌مانده در سطح اتصال است. استحکام برشی نمونه‌های متصل شده در دمای اتاق طبق استانداردASTM D2295-96 ارزیابی شدند. برای این منظور هر یک از نمونه‌های تست برش بصورت استوانه‌هایی به قطر 32 میلی‌متر و طول 30 میلی‌متر بریده شدند [15].

نمونه‌های جوشکاری شده با لایه میانی مس در نگهدارنده نشان داده شده در شکل(2) قرار داده شدند و به فک‌های دستگاه تست کشش بسته شدند تا نیروی قائم و کششی توسط فک بصورت برشی و موازی با فصل مشترک به نمونه‌ها اعمال شود.



شکل 2- شماتیکی از نگهدارنده آزمون استحکام برشی استفاده شده [15].

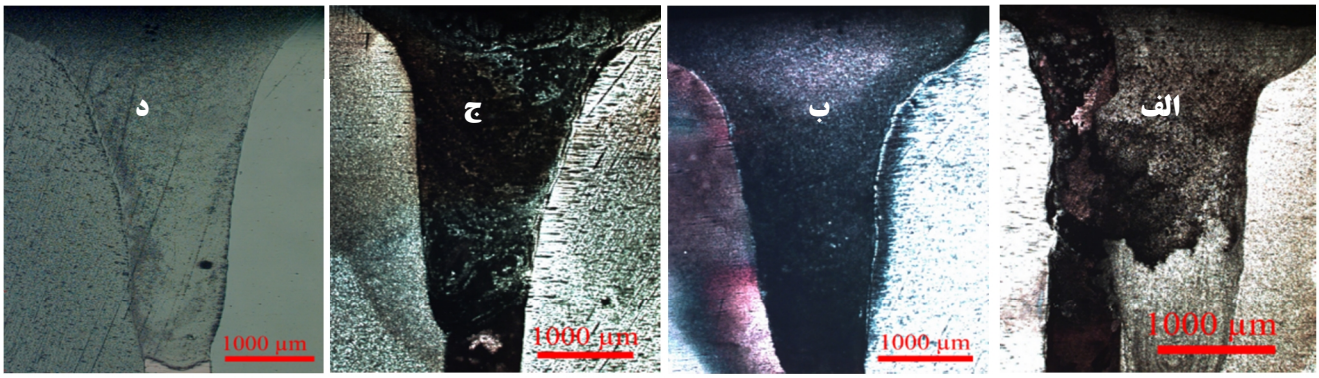
3- بحث و نتایج

میزان حرارت ورودی و کنترل ترکیب شیمیایی حوضچه جوش دو پارامتر کلیدی جهت تحقق فرایند جوشکاری غیر هم جنس می‌باشند. در جوشکاری غیرهمجنس، انحراف پرتو یک پارامتر کلیدی برای کنترل نسبت بین مواد ذوب‌شده می‌باشد، درحالی‌که سرعت جوشکاری بیشتر بر طول حوضچه جوش تأثیر می‌گذارد و به همین ترتیب، عمر حوضچه جوش را تعریف می‌کند. در این پژوهش برای تغییر ترکیب حوضچه جوش، چهار مقدار مختلف جابجایی پرتو از خط وسط جوش به سمت فولاد و برای تغییر عمر حوضچه جوش دو مقدار مختلف سرعت جوشکاری استفاده شد.

3-1- تاثیر انحراف پرتو بر ریزساختار اتصال در سرعت 0/7 متر بر دقیقه

در این بخش به بررسی ریزساختار و ترکیب شیمیایی اتصال در سرعت 0/7 متر بر دقیقه با چهار مقدار انحراف پرتو 0، 0/2،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]



شکل3-تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع اتصال با سرعت 0/7 متر بر دقیقه الف- انحراف پرتو صفر ب- انحراف پرتو 0/2 ج-انحراف پرتو 0/4 د- انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر.

0/4 و 0/6 میلی‌متر پرداخته می‌شود. در شکل(3) سطح مقطع اتصال این دو آلیاژ برای مقادیر مختلف انحراف پرتو نشان داده‌شده است. همان طور که مشاهده می شود هیچ‌گونه ترکی در حوضچه جوش وجود ندارد اما ممکن است در مناطق کناری فلزات پایه جدایش وجود داشته باشد که در ادامه بر روی این موضوع بحث خواهد شد. بنابراین لایه واسط با ضخامت 1 میلی‌متر می‌تواند نقش بسزایی در حذف و کاهش ترکیبات بین‌فلزی و افزایش کیفیت متالورژیکی جوش داشته باشد.

شکل‌های(4 و5) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع اتصال در ناحیه نزدیک به تیتانیوم و حوضچه جوش را برای انحراف پرتوهای متفاوت نشان می‌دهد. برای تعیین ترکیبات و فازهای ایجادشده در حوضچه جوش، SEM-EDS مورد استفاده قرار گرفت. از نمودارهای فازی دوتاییCu-Ti، Cu-Fe و Fe-Ti و نمودار فازی سه‌تایی Ti-Fe-Cu برای بررسی فازها و واکنش‌های متالورژیکی در طول انجماد استفاده گردید [16-18]. در شکل(6) نمودارهای فازی دوتایی و در شکل (7) نمودار فازی سه‌تایی Ti-Fe-Cu نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود در ناحیه نزدیک به تیتانیوم در انحراف پرتوهای 0 و 0/2 میلی‌متر، محلول جامد مس و ترکیبات بین‌فلزی $TiCu_2$ و در انحراف پرتوهای 0/4 و 0/6 میلی‌متر، محلول جامد مس و ترکیبات بین‌فلزی TiCu تشکیل می‌شود. این نوع ساختار را می‌توان یک کامپوزیت زمینه مسی تقویت شده با ترکیبات بین فلزی در نظر گرفت. در ناحیه حوضچه جوش در انحراف پرتوهای 0 و 0/2 میلی‌متر، ترکیبات بین‌فلزی $TiFe_2+TiCr_2$ و در انحراف پرتوهای 0/4 و 0/6 میلی‌متر، محلول جامد آهن (α-Fe)، محلول جامد مس و ترکیبات بین‌فلزی TiCu تشکیل می شود. میزان انحراف پرتو، تأثیر مستقیمی در کنترل ترکیب حوضچه جوش دارد و این مهم‌ترین دلیل برای حذف یا کاهش ترکیبات بین‌فلزی می‌باشد. میل تیتانیوم برای ترکیب با مس بسیار کمتر از میل برای ترکیب با آهنمی باشد. از این رو هنگامی‌که میزان آهن در حوضچه جوش افزایش می‌یابد محلول جامد مس و آهن بیشتری تشکیل شده و مانعی در برابر تشکیل ترکیبات بین فلزی با حضور تیتانیوم ایجاد می‌شود. واکنش متالورژیکی نسبتاً ساده می‌باشد. طبق نمودارهای تعادلی، فاز $TiFe_2$ در ابتدا جوانه می زند و در حین خنک کاری به علت دمای بالای ذوب آن (1427 درجه سانتی‌گراد) در مقایسه با مس (1083 درجه سانتی‌گراد) به ساختار دندریتی تبدیل می‌شود. همان طور که در شکل(5-ج و 5-د) مشاهده می‌شود محلول جامد مس به‌صورت لایه‌های سفید مشاهده می‌شود. حضور این فاز، ترکیبات بین‌فلزی را در حوضچه جوش کاهش و انعطاف‌پذیری اتصال را افزایش می‌دهد. ترکیبات بین فلزی $TiFe_2+TiCr_2$ از ناحیه حوضچه جوش در نمونه‌های 3 و 4به طور کامل حذف شده‌اند

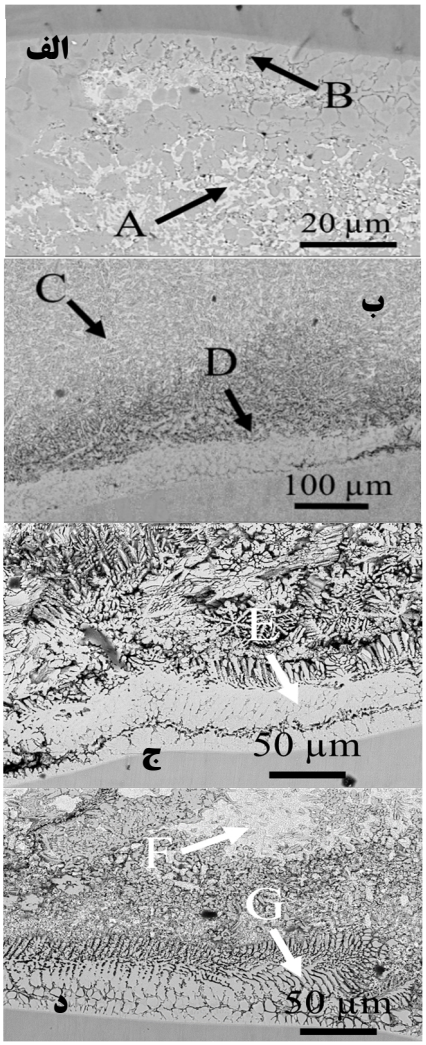
در جداول (4 و 5) ترکیب شیمیایی فازهای مختلف در ناحیه نزدیک به تیتانیوم و حوضچه جوش در نمونه‌های جوشکاری

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]

شده با سرعت 0/7 متر بر دقیقه در مقادیر مختلف انحراف پرتو نشان داده شده است. با مقایسه درصد وزنی عناصر مشهود است که مقادیر تیتانیوم و آهن به پارامترهای جوشکاری بستگی دارد. با افزایش میزان انحراف پرتو از مرکز جوش به سمت فولاد، درصد وزنی عنصر تیتانیوم در حوضچه جوش کاهش و درصد وزنی عنصر آهن و مس افزایش می‌یابد. با انحراف پرتو جوشکاری از مرکز جوش به سمت فولاد سعی می‌شود تا درصد وزنی تیتانیوم در حوضچه جوش کاهش پیدا کند و لایه واسط مس که سازگاری متالورژیکی بیشتری با آهن جهت تشکیل محلول جامد را دارد، فرصت داشته باشد تا این ترکیب را تشکیل داده و از حضور ترکیبات بین فلزی بکاهد یا این ترکیبات را حذف کند.

از آزمون تفرق اشعه ایکس (XRD) برای بررسی دقیق تر و آنالیز فازهای تشکیل شده استفاده گردید. در شکل(8) نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس برای نمونه شماره 4 ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده حضور فاز محلول جامد مس، محلول جامد آهن (آهن آلفا) و نیز ترکیبات بین‌فلزی TiCu را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از آزمون تفرق اشعه ایکس با اطلاعات به‌دست‌آمده از آنالیز نقطه‌ایی مطابقت دارد.

در شکل (9) آنالیز نقاط در امتداد خط عمود بر فصل مشترک اتصال نمایش داده‌شده است. این آنالیز خطی دلیل دیگری بر کنترل ترکیب شیمیایی حوضچه جوش توسط انحراف پرتو به سمت فولاد می‌باشد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود عنصر تیتانیوم در فصل مشترک بین حوضچه مذاب و آلیاژ تیتانیوم افت محسوسی دارد. همچنین با افزایش فاصله از فصل مشترک بین آلیاژ تیتانیوم و حوضچه مذاب، مقدار عنصر آهن افزایش می‌یابد. لایه واسط مس در فاصله 900 میکرومتر اولیه نمودار در بیشترین مقدار خود قرار دارد و نقش خود را به‌عنوان لایه واسط در ترکیب حوضچه جوش به‌خوبی ایفا کرده است. درنتیجه ضخامت لایه میانی مس و انحراف پرتو به‌طور مناسبی انتخاب‌شده‌اند و به‌طور کامل از رسیدن عناصر تیتانیوم و فولاد به یکدیگر و تشکیل ترکیبات بین‌فلزی پایه آهن-تیتانیوم جلوگیری شده است.



شکل 4- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع اتصال در ناحیه نزدیک به تیتانیوم با سرعت 0/7 متر بر دقیقه
الف- انحراف پرتو صفر ب- انحراف پرتو 0/2 میلی‌متر
ج- انحراف پرتو 0/4 میلی‌متر د- انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر.

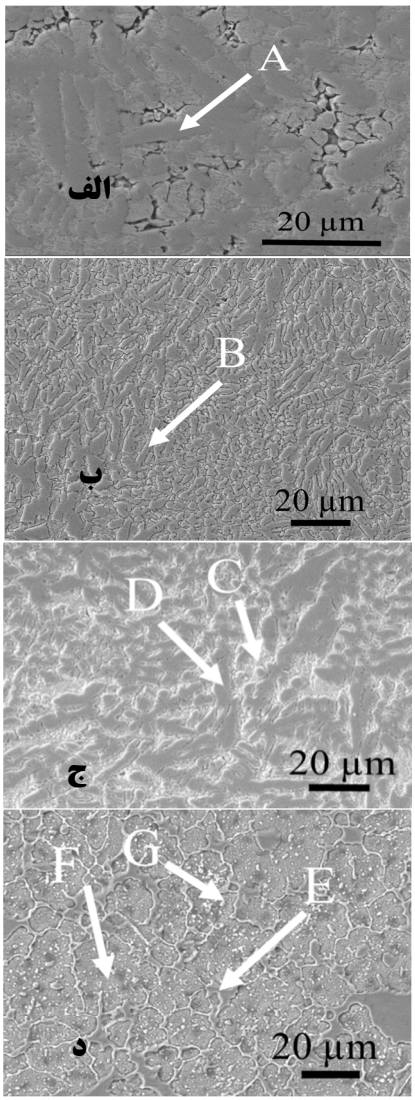
جدول 4-آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل 4 برحسب درصد وزنی

انحراف پرتو (میلی‌متر)	مناطق	Fe	Ti	Cu	Cr	فازهای تشکیل‌شده
0	A	13/1	10/7	74/3	1/9	Cu(SS)
0	B	9/1	30/2	57/8	2/9	$TiCu_2$
0/2	C	14/6	7/8	75/5	2/1	Cu(SS)
0/2	D	11/2	26/6	58/8	3/4	$TiCu_2$
0/4	E	5/9	44/8	45/9	3/3	TiCu
0/6	F	16/7	4/4	76/7	2/2	Cu(SS)
0/6	G	6/8	44/1	46/2	2/9	TiCu

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]

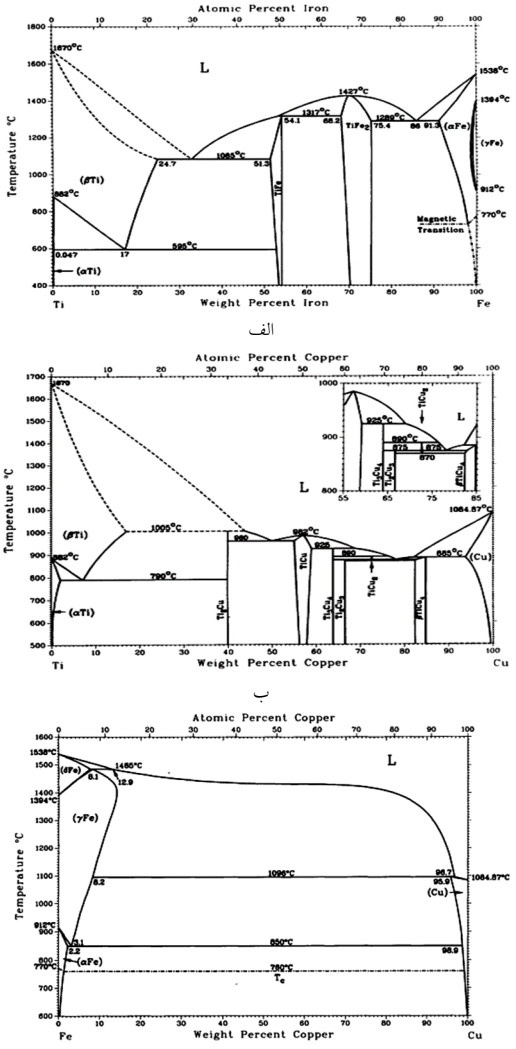
جدول 5-آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل 5 برحسب درصد وزنی

فازهای تشکیل‌شده	Cr	Cu	Ti	Fe	مناطق	انحراف پرتو (میلی‌متر)
$TiFe_2$ +$TiCr_2$	12/8	5/6	26/9	54/7	A	0
$TiFe_2$ +$TiCr_2$	11/4	8/5	22/6	57/5	B	0/2
Cu(SS)	1/3	88/9	2/4	7/4	C	0/4
α -Fe	13/6	13/4	6/7	66/3	D	0/4
α -Fe	13/8	13/9	5/1	67/2	E	0/6
Cu(SS)	1/1	90/4	1/9	6/6	F	0/6
TiCu	3/7	45/8	44/3	6/2	G	0/6

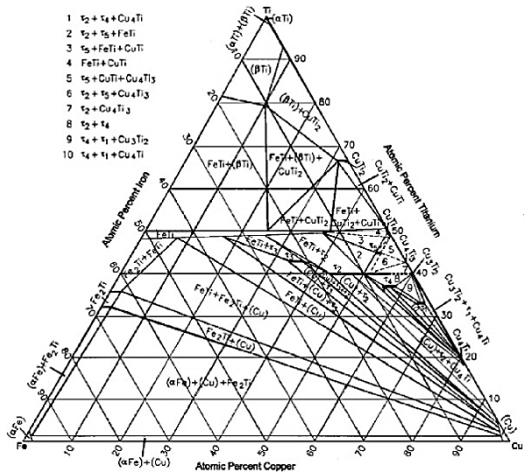


شکل 5- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع اتصال در مرکز جوش با سرعت 0/7 متر بر دقیقه

الف-انحراف پرتو صفر ب- انحراف پرتو 0/2 میلی‌متر ج- انحراف پرتو 0/4 میلی‌متر د- انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر.



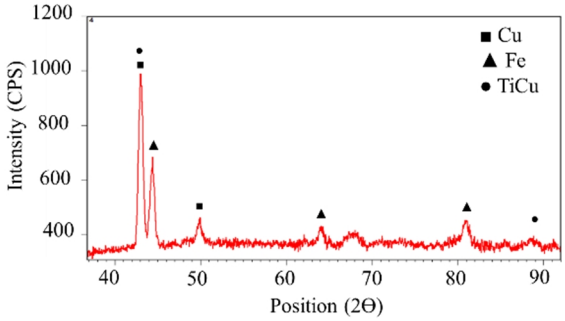
شکل6- نمودار فازی دوتایی الف- تیتانیوم-آهن، ب- تیتانیوم-مس ج- آهن- مس.



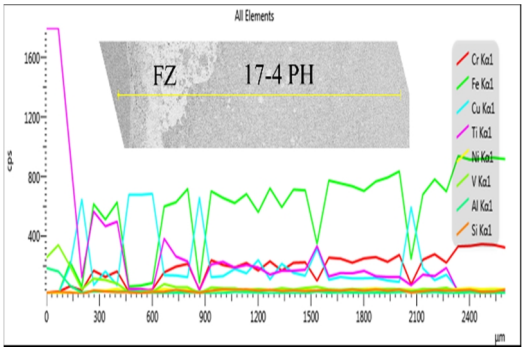
شکل 7- نمودار فازی سه تایی Ti-Fe-Cu.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]



شکل 8- الگوی پراش اشعه ایکس از سطح مقطع اتصال با سرعت جوشکاری 0/7 متر بر دقیقه و میزان انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر.

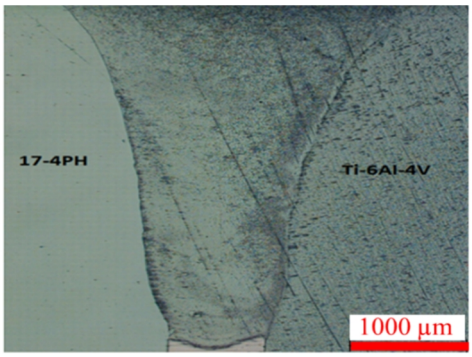


شکل 9- آنالیز خطی از سطح مقطع اتصال با سرعت جوشکاری 0/7 متر بر دقیقه و میزان انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر.

3-2- تاثیر انحراف پرتو بر ریزساختار اتصال در سرعت 0/9 متر بر دقیقه

برای اینکه از ورود تیتانیوم به حوضچه جوش کاسته شود لازم است که حرارت ورودی جوش و عمر حوضچه جوش کاهش یابد که با افزایش سرعت جوشکاری می‌توان به این نتیجه رسید. برای این منظور، سرعت جوشکاری 0/9 متر بر دقیقه انتخاب شد و انحراف پرتو مانند قسمت قبلی در چهار مقدار مشخص‌شده در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل (10) مشاهده می‌شود هیچ‌گونه ترک و جدایشی در حوضچه جوش وجود ندارد.

در شکل‌های(11 و12) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع اتصال در ناحیه نزدیک به تیتانیوم و حوضچه جوش در انحراف پرتوهای مختلف نشان داده‌شده است. همان طور که در شکل(11-الف و 11-ب) (انحراف پرتوهای 0 و 0/2 میلی‌متر) مشاهده می شود در فصل مشترک اتصال، محلول جامد مس و ترکیبات بین‌فلزی $TiCu_2$ تشکیل شده است در حالی‌که در انحراف پرتوهای 0/4 و 0/6 میلی‌متر، محلول جامد مس و ترکیبات بین‌فلزی TiCu تشکیل می‌شود. در ناحیه حوضچه جوش در انحراف پرتوهای 0 و 0/2 میلی‌متر، ترکیبات بین‌فلزی $TiFe_2$+$TiCr_2$ و در انحراف پرتوهای 0/4 و 0/6 میلی‌متر، محلول جامد آهن (α-Fe)، محلول جامد مس و ترکیبات بین‌فلزی TiCu تشکیل می شود.



شکل 10- تصویر میکروسکوپی نوری از سطح مقطع با سرعت 0/9 متر بر دقیقه اتصال و انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر.

همان طور که در شکل (11-د و 12-د) مشاهده می‌شود، ترک‌ها در ناحیه حوضچه جوش به طور کامل حذف‌شده‌اند و هیچ گونه جدایشی در حوضچه جوش وجود ندارد. فازهای بلوکی شکل محلول جامد مس و محلول جامد آهن در حوضچه جوش تشکیل شده‌اند و اثری از فازهای ترد و شکننده بین‌فلزی با ساختار پیوسته و سوزنی شکل وجود ندارد.

در جداول(6 و7) ترکیب شیمیایی فازهای مختلف در ناحیه نزدیک به تیتانیوم و حوضچه جوش در نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت 0/9 متر بر دقیقه در مقادیر مختلف انحراف پرتو نشان داده شده است. با مقایسه درصد وزنی عناصر مشهود است که افزایش میزان انحراف پرتو از مرکز جوش به سمت فولاد منجر به کاهش درصد وزنی عنصر تیتانیوم در حوضچه جوش و افزایش درصد وزنی عناصر آهن و مس می‌شود.

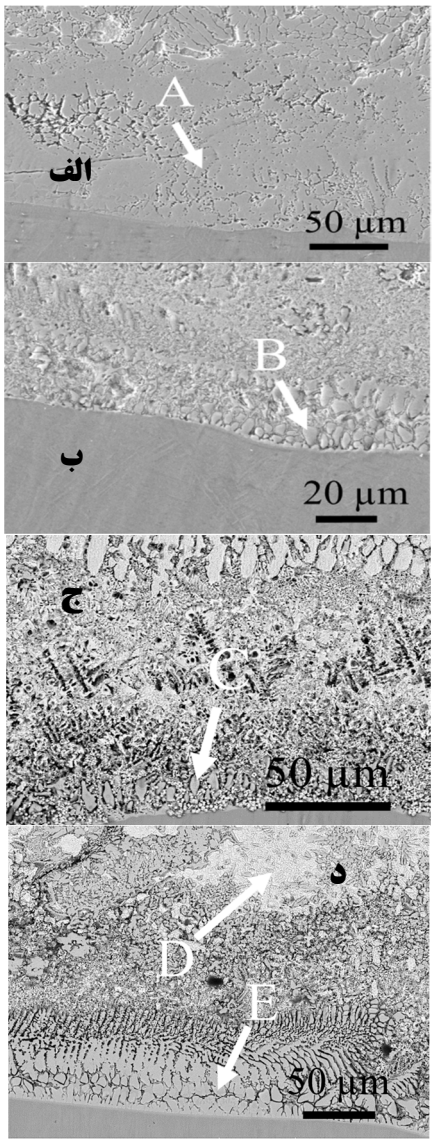
با مقایسه ترکیب شیمیایی نمونه‌های جوشکاری شده با دو سرعت مختلف مشاهده می‌شود که افزایش سرعت جوشکاری باعث کاهش درصد وزنی تیتانیوم و افزایش درصد وزنی آهن و مس در حوضچه جوش می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در سرعت جوشکاری بالاتر، میل حوضچه جوش به تشکیل ترکیبات بین‌فلزی کاهش می‌یابد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]

جدول 6- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل 11 برحسب درصد وزنی.

فازهای تشکیل‌شده	Cr	Cu	Ti	Fe	مناطق	انحراف پرتو (میلی‌متر)
$TiCu_2$	2/3	60/7	26/3	10/7	A	0
$TiCu_2$	2/8	61/2	24/8	11/2	B	0/2
TiCu	1/4	47/9	43/3	7/4	C	0/4
Cu(SS)	2/6	73/1	4/8	19/5	D	0/6
TiCu	0/7	49/1	41/7	8/5	E	0/6



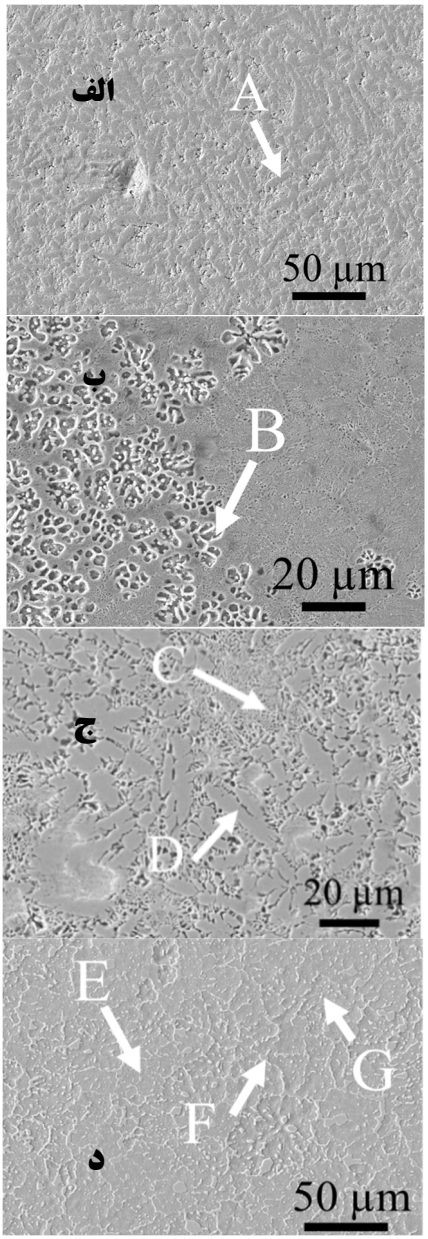
شکل 11- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع اتصال در ناحیه نزدیک به تیتانیوم با سرعت 0/9 متر بر دقیقه
الف-انحراف پرتو صفر ب- انحراف پرتو 0/2 میلی‌متر ج-انحراف پرتو 0/4 میلی‌متر د-انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر.

در شکل(13) نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس برای نمونه شماره 8 ارائه شده است. پیک‌های مشخص‌شده در این الگو نشان می‌دهد که فازهای غالب در حوضچه جوش، فاز محلول جامد مس، محلول جامد آهن (آهن آلفا) و نیز ترکیبات بین-فلزی TiCu می باشند نتایج به دست آمده از آزمون تفرق اشعه ایکس با اطلاعات به‌دست‌آمده از آنالیز نقطه‌ایی مطابقت دارد.

در شکل(14) آنالیز نقاط در امتداد خط عمود بر فصل مشترک اتصال نمایش داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می شود عناصر نیکل، کروم، وانادیوم و آلومینیوم به طور یکنواخت در حوضچه جوش توزیع شده‌اند. توزیع یکنواخت عناصر اصلی به این معنی است که فلزمذاب در حوضچه مذاب به‌اندازه کافی مخلوط شده است و هیچ جدایشی در فصل مشترک اتفاق نیافته است. نفوذ تیتانیوم به داخل فولاد زنگ‌نزن بسیار کم می‌باشد که به علت نرخ خنک کاری زیاد ناشی از افزایش سرعت جوشکاری است. در فصل مشترک بین حوضچه مذاب و آلیاژ تیتانیوم مشاهده می‌شود که مقدار تیتانیوم با شیب تندی کاهش پیداکرده است. با مقایشه شکل‌های(9 و14) می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سرعت جوشکاری از 0/7 متر بر دقیقه به 0/9 متر بر دقیقه نقش قابل‌توجهی در کاهش ورود عنصر تیتانیوم به داخل حوضچه جوش دارد. این موضوع دلیل مهمی برای کاهش ترکیبات بین‌فلزی در حوضچه جوش می‌باشد.

در شکل(15) نقشه توزیع عناصر آلیاژی (map) از سطح مقطع اتصال با سرعت 0/9 متر بر دقیقه و انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود آهن و مس بیشتر از تیتانیوم در حوضچه جوش توزیع شده‌اند و میزان عنصر تیتانیوم در حوضچه جوش در پایین‌ترین مقدار می‌باشد. همچنین عنصر کروم نیز به‌صورت پراکنده در حوضچه جوش وجود دارد که این پراکندگی و مقدار کم تیتانیوم در حوضچه جوش از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی پیوسته بر پایه کروم جلوگیری می‌کند. در سطوحی از حوضچه جوش انباشتگی عنصر مس وجود دارد که این انباشتگی می‌تواند مقدار سختی جوش را کاهش و انعطاف‌پذیری اتصال را افزایش دهد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]



شکل12- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع اتصال در مرکز جوش با سرعت 0/9 متر بر دقیقه

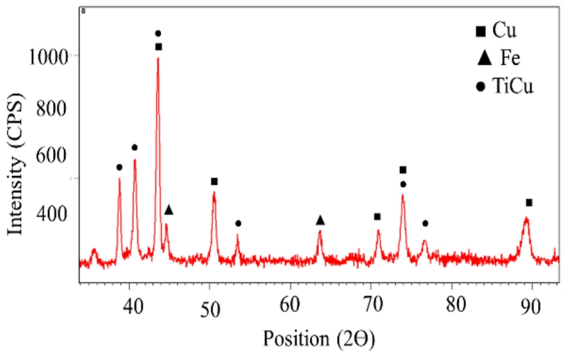
الف -انحراف پرتو صفر ب - انحراف پرتو 0/2 میلی‌متر ج - انحراف پرتو 0/4 میلی‌متر د - انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر.

3-3- بررسی خواص مکانیکی اتصال

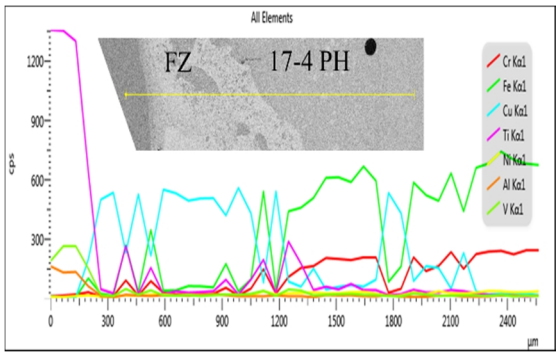
نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت 0/7 متر بر دقیقه و 0/9 متر بر دقیقه با مقادیر مختلف انحراف پرتو که قبلاً ذکرشد، تحت آزمون سختی سنجی قرار گرفتند. براین اساس سختی سنجی در راستای عمود بر فصل مشترک اتصال در 9 نقطه که از سمت فلزپایه 17-4PH شروع‌شده و به سمت فلز پایه Ti-6Al-4V حرکت می‌کند، انجام شد و نتایج سختی برحسب ویکرز گزارش شدند. محل‌های سختی سنجی به‌گونه‌ای انتخاب‌شده‌اند که نقاط 1 و 9 در فلزات پایه و نقاط 7،3،2 و 8 در نواحی فصل مشترک حوضچه جوش و فلزپایه و نقاط 5،4 و 6 در حوضچه جوش انتخاب‌شدند.

جدول 7- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل 12 برحسب درصد وزنی.

انحراف پرتو (میلی‌متر)	مناطق	Fe	Ti	Cu	Cr	فازهای تشکیل‌شده
0	A	55/9	24/7	6/7	12/7	$TiFe_2$ +$TiCr_2$
0/2	B	58/8	20/3	9/4	11/5	$TiFe_2$ +$TiCr_2$
0/4	C	7/6	2/1	89/2	1/1	Cu(SS)
0/4	D	68/9	4/2	14/8	12/1	α -Fe
0/6	E	69/2	3/9	15/7	11/2	α -Fe
0/6	F	6/9	1/4	90/8	0/9	Cu(SS)
0/6	G	7/3	42/7	47/9	2/1	TiCu



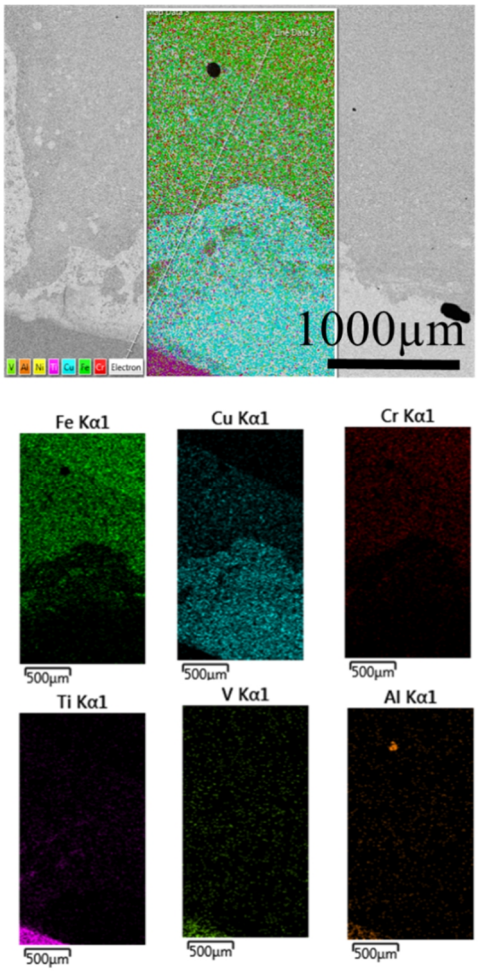
شکل 13- الگوی پراش اشعه ایکس از سطح مقطع اتصال با سرعت جوشکاری 0/9 متر بر دقیقه و میزان انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر.



شکل 14- آنالیز خطی از سطح مقطع اتصال با سرعت جوشکاری 0/9 متر بر دقیقه و میزان انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر.

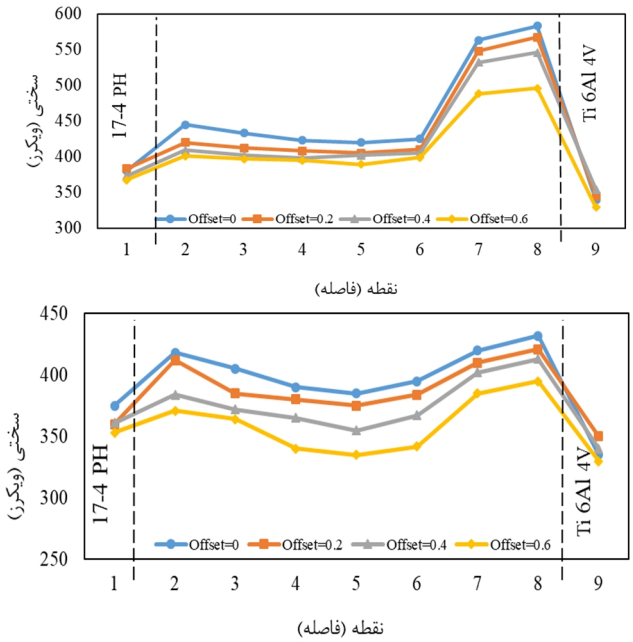
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]



شکل 15- نقشه توزیع عناصر آلیاژی از سطح مقطع اتصال با سرعت 0/9 متر بر دقیقه و انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر.

همان‌طور که از پروفیل میکرو سختی در شکل(16) مشاهده می‌شود بیشترین میزان میکروسختی در سطح مشترک حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم و همچنین در سطح مشترک حوضچه جوش و فولاد وجود دارد که به سبب حضور ترکیبات بین فلزی با سختی بالا در این مناطق می‌باشد. در نمونه‌های جوشکاری شده در انحراف پرتو صفر و 0/2 میلی‌متر، ترکیب بین فلزی $TiFe_2$+$TiCr_2$ با سختی بالا در اتصال وجود دارد. حضور فازهای ترد و شکننده علت اصلی افزایش سختی در فصل مشترک بین حوضچه جوش و تیتانیوم می‌باشد. در نمونه‌های جوشکاری شده در انحراف پرتو 0/4 و 0/6 میلی‌متر، میزان سختی کاهش یافته است. واضح است که ریزساختار α-Fe، Cu(SS) و TiCu می‌تواند سختی منطقه جوشکاری شده را کاهش دهد.



شکل 16- پروفیل میکروسختی نقاط مختلف در انحراف پرتوهای مختلف الف- سرعت 0/7 متر بر دقیقه ب- سرعت 0/9 متر بر دقیقه.

با مقایسه شکل‌های(16-الف و 16-ب) مشاهده می‌شود که در نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت بالا، میزان سختی در فصل مشترک بین حوضچه جوش و تیتانیوم و همچنین در نقاط داخل حوضچه جوش کاهش یافته است. افزایش سرعت جوشکاری در انحراف پرتوهای ثابت، موجب ذوب کمتر تیتانیوم و درنتیجه کاهش ورود آن به حوضچه جوش می‌شود و از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی جلوگیری می‌کند. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت جوشکاری از 0/7 متر بر دقیقه به 0/9 متر بر دقیقه، سختی کاهش می‌یابد که موید کاهش تشکیل ترکیبات بین فلزی در منطقه اتصال می باشد.

در انحراف پرتو صفر و 0/2 میلی‌متر، سختی در حوضچه جوش در حدود 385 ویکرز می‌باشد که به دلیل فازهای ترد با سختی بالا می باشد که در حوضچه جوش تشکیل شده است. در انحراف پرتو 0/4 و 0/6 میلی‌متر، تشکیل فاز TiCu سبب می‌شود که سختی حوضچه جوش به شدت کاهش یابد (سختی حوضچه جوش برای انحراف پرتو 0/4 در حدود 360 ویکرز و سختی حوضچه جوش برای انحراف پرتو 0/6 در حدود 340 ویکرز می‌باشد). فاز TiCu محصول واکنش یوتکتیک $L \rightarrow Ti_2Cu + TiCu$ می‌باشد و طبق نمودار تعادلی تیتانیوم-

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]

مس، یک ترکیب بین فلزی است ولی این فاز سختی و تردی به مراتب پایین‌تری از فاز TiFe دارد [9]. در نتیجه انعطاف پذیری اتصال به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد.

جدول 8- نتایج استحکام برشی.

نمونه	انحراف پرتو (mm)	سرعت جوشکاری (m/min)	استحکام برشی (MPa)
3	0/4	0/7	180
4	0/6	0/7	210
7	0/4	0/9	230
8	0/6	0/9	250

در فصل مشترک آلیاژ تیتانیوم و حوضچه جوش در نمونه جوشکاری شده با سرعت 0/9 متر بر دقیقه و انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر، سختی در حدود 380 ویکرز می‌باشد. این میزان سختی نشان می‌دهد که در این ناحیه، ترکیبات بین‌فلزی پایه آهن وجود ندارد و سختی این ناحیه که محل اصلی تجمع ترکیبات بین‌فلزی می‌باشد نسبت به فلز پایه افزایش چشمگیری نداشته است.

برای بررسی خواص مکانیکی اتصال از استحکام برشی استفاده شد. بر این اساس نمونه‌های استوانه‌ای به قطر 32 میلی‌متر و طول 30 میلی‌متر از دو آلیاژ Ti-6Al-4V و فولاد 17-4PH تهیه گردید و سپس نمونه‌ها با استفاده از فیکسچر مخصوص تحت نیروی برشی قرار گرفتند. در جدول (8) نتایج استحکام برشی برای نمونه های 3،4،7 و8 ارائه شده است.

با مقایسه نمونه‌های 3 با 4 و 7 با 8 مشاهده می شود که افزایش میزان انحراف پرتو در سرعت ثابت بر میزان استحکام جوش نقش مؤثری دارد و در انحراف پرتوهای بیشتر، استحکام برشی اتصال افزایش می یابد. همچنین با افزایش سرعت جوشکاری در انحراف پرتوی ثابت، میزان استحکام برشی اتصال افزایش می‌یابد. افزایش سرعت جوشکاری همراه با انحراف پرتو از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی پایه آهن در حوضچه جوش جلوگیری می‌کند و باعث ایجاد محلول جامد آهن و مس می‌شود.

نمونه جوشکاری شده با سرعت جوشکاری 0/9 متر بر دقیقه و میزان انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر دارای بیشترین استحکام برشی معادل 250 مگاپاسکال بود. شکست در تمامی نمونه‌ها در فصل مشترک حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم اتفاق افتاد که این نشان می‌دهد ضعیف‌ترین ناحیه جوش، این فصل مشترک می‌باشد زیرا ترکیبات بین‌فلزی ترد و شکننده از حوضچه مذاب و به خصوص از فصل مشترک تیتانیوم و حوضچه مذاب به‌طور کامل حذف نشده‌اند. اگرچه ترکیبات بین فلزی در منطقه نزدیک تیتانیوم و حوضچه مذاب وجود دارند اما آن‌ها از ترکیبات بین فلزی Ti-Cu تشکیل شده‌اند که تردی کمتری نسبت به ترکیبات بین فلزی Ti-Fe دارند. این مورد منجر به دستیابی به یک اتصال بهتر شده است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جوشکاری پرتو الکترونی فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت شونده 17-4PH و آلیاژ Ti-6Al-4V با لایه میانی مس با ضخامت 1 میلی‌متر انجام پذیرفت و تأثیر پارامترهای جوشکاری بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال بررسی شد. دو سرعت جوشکاری مختلف 0/7 و 0/9 متر بر دقیقه با چهار میزان انحراف پرتو (0، 0/2، 0/4 و 0/6 میلی‌متر) از مرکز لایه میانی به سمت فولاد برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل می باشد:

- با استفاده از لایه میانی مس با ضخامت یک میلی‌متر، ترک‌های ناشی از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی از حوضچه جوش حذف می‌شوند.
- در فصل مشترک بین تیتانیوم و حوضچه جوش در انحراف پرتوهای 0 و 0/2 میلی‌متر، محلول جامد مس و ترکیبات بین‌فلزی $TiCu_2$ و در انحراف پرتوهای 0/4 و 0/6 میلی‌متر، محلول جامد مس و ترکیبات بین‌فلزیTiCu تشکیل می‌شود.
- در ناحیه حوضچه جوش در انحراف پرتوهای 0 و 0/2 میلی‌متر، ترکیبات بین‌فلزی $TiFe_2$+$TiCr_2$ و در انحراف 0/4 و 0/6 میلی‌متر، محلول جامد آهن (α -Fe)، محلول جامد مس و ترکیبات بین‌فلزی TiCu تشکیل می‌شود.
- بیشترین میزان سختی در سطح مشترک حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم و همچنین در سطح مشترک حوضچه جوش و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]

فولاد مشاهده می‌شود که به سبب حضور ترکیبات بین فلزی با سختی بالا در این مناطق می‌باشد. با افزایش سرعت جوشکاری و میزان انحراف پرتو، سختی کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده در ساختار اتصال می‌باشد.

- با افزایش میزان انحراف پرتو از 0/4 میلی‌متر به 0/6 میلی‌متر در سرعت 0/7 متر بر دقیقه، استحکام برشی اتصال از 180 مگاپاسکال به 210 مگاپاسکال و در سرعت 0/9 متر بر دقیقه، استحکام برشی اتصال از 230 مگاپاسکال به 250 مگاپاسکال افزایش می‌یابد.

- نمونه جوشکاری شده با سرعت جوشکاری 0/9 متر بردقیقه و میزان انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر دارای بیشترین استحکام برشی معادل 250 مگاپاسکال می باشد. شکست در تمامی نمونه‌ها در فصل مشترک بین حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم اتفاق می‌افتاد که نشان می‌دهد ضعیف‌ترین ناحیه جوش، این فصل مشترک می‌باشد.

منابع

1- AWS Technical Activities Committee, "Recommended practices for electron beam welding and allied processes", 4rd edn, American welding society, Miami, 2013.

2- Carreon, H., Carreon, M., Duenas, A., "Assessment of precipitates of aged Ti-6Al-4V alloy by ultrasonic attenuation". *Philos Mag*, vol.97, pp.58-68, 2017.

3- Lippold, J.C., Kotecki, D.J., "Welding metallurgy and weldability of stainless steel ", John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.

4- Jenney, C..L., Brien, A.O., "Welding Handbook: Electron Beam Welding", 8rd edn, American welding society, Miami, 1991.

5- Powers, D.E., "Electron Beam Welding-An Overview", *Proc. Int. Power. Beam. Conf.*, San Diego, vol.2, pp. 114-128, 1988.

6- Ting, W., Zhang, B., Feng, J., "Influences of different filler metals on electron beam welding of titanium alloy to stainless steel". *Trans Nonferrous Met Soc China.* vol.24, pp.108-114, 2014.

7- Adomako, N.k., Kim, J.O., Lee, S.H., Noh, K.H., Kim, J.H., "Dissimilar welding between Ti-6Al-4V and 17-4 PH stainless steel using a vanadium interlayer". *Mater Sci Eng A.* vol.372, pp. 378-379, 2018.

8- Ting, W., Binggang, Z., Jicai, F., Qi, T., "Effect of copper filler metal on the microstructure and mechanical properties of electron beam welded titanium-stainless steel joint". *Mater Charact.* vol.73, pp.104-113. 2012,

9- Ting, W., Zhang, B., Feng, J., Tang, Q., "Electron beam welding of Ti-15-3 titanium alloy to 304 stainless steel with copper interlayer sheet". *Trans Nonferrous Met Soc China.* vol.20, pp.829-1834, 2011.

10- Wang, T., Zhang, B., Chen, G., Feng, J., "High strength electron beam welded titaniumestainless steel joint with V/Cu based composite filler metals". *Vacuum.* vol.94, pp.41-47, 2013.

11- Tomashchuk, I., Sallamand, P., Belyavina, N., Pilloz, M., "Evolution of microstructure and mechanical properties during dissimilar electron beam welding of titanium-stainless steel via copper interlayer. *Mater Sci Eng A.* vol.285, pp.114-122, 2013.

12- Tomashchuk, I., Sallamand, P., Belyavina, N., Pilloz, M., "Evolution of microstructures and mechanical properties during dissimilar electron beam welding of titanium alloy to stainless steel via copper interlayer". *Mater Sci Eng A.* vol.585, pp.114–122, 2013.

13- مهدوی شاکر ع.، مومنی ح.، خرم ع. و یزدی پور ع.، "تاثیر پارامترهای جوشکاری پرتو الکترونی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیر همجنس آلیاژ Ti-6Al-4V به فولاد زنگ‌نزن 17-4PH"، **نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، دوره 8، شماره 2**، 113-125، پاییز و زمستان 1401.

14- American Welding Society, Welding Handbook (Vol. 2):Welding Processes, 8rd. ed., p. 699, AWS, Miami, 1991.

15- Kundu, S. "Interface microstructure and strength properties of Ti64 and microduplex stainless steel diffusion bonded joints". *Mater Des.* vol.32, pp. 2997-3003, 2011.

16- Murray, J.L., "The Cu–Ti(copper–titanium) system". *J Phase Equilib.* vol.4, pp. 81-95, 1983.

17- Chen, Q., Jin, Z.P., "The Fe–Cu system: a thermodynamic evaluation". *Metall Mater Trans A.* vol.26: 417-426, 1995.

18- Beek, J.A., Kodentsov, A.A., Loo, F.J.J., "Phase equilibria in the Cu–Fe–Ti system at 1123 K". *J Alloys Compd.* vol.217, pp. 97–103, 1995.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.01]