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

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

Volume 8, Number 2, 2023



The effect of electron beam welding parameters on the microstructural characteristics and mechanical properties of dissimilar joint between 17-4PH steel and Ti6Al4V alloy

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

Received 10 January 2023 ; Accepted 9 March 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 precipitation hardening stainless steel and Ti_6Al_4V alloy. For this purpose, the welding of these two alloys was done without an interlayer and with an interlayer of copper with a thickness of 0.8 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 perform experiments. The results show that in the direct welding of titanium and steel, the joint structure consists of TiFe and $TiFe_2$+$TiCr_2$ intermetallic compounds with high hardness (about 900 Vickers). In the welding of titanium and steel by using the copper interlayer, the structure in the weld pool and the interface between the weld pool and steel includes a solid solution of copper and $TiFe_2$ intermetallic compounds, and at the interface between the weld pool and titanium includes Ti+Ti_2Cu and TiFe. The hardness of the welding zone in the samples welded with copper interlayer is about 400 Vickers. The highest value of hardness is observed at the interface between the weld pool and titanium alloy, as well as at the interface between the weld pool and steel, which is due to the presence of intermetallic compounds with high hardness. By increasing the welding speed and beam offset, the hardness decreases, which is due to the reduction of brittle intermetallic compounds in the joint structure. The welded sample with a welding speed of 0.9 m/min and beam offset of 0.6 mm has the highest shear strength equal to 160 MPa.

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

Corresponding Author: a_khorram@mut.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هشتم، شماره2، پاییز و زمستان 1401

تاثیر پارامترهای جوشکاری پرتو الکترونی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیر همجنس آلیاژ Ti-6Al-4V به فولاد زنگ‌نزن PH4-17

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

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

دریافت مقاله: 1401/10/20 ؛ پذیرش مقاله: 1401/12/18

چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری پرتو الکترونی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت شونده 17-4PH و آلیاژ Ti-6Al-4V می‌باشد. برای این منظور، جوشکاری این دو آلیاژ بدون لایه واسط و با لایه میانی مس با ضخامت 0/8 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 آزمایش‌های استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که در امتزاج مستقیم تیتانیوم و فولاد، ساختار اتصال متشکل از ترکیبات بین فلزی TiFe و $TiFe_2$ +$TiCr_2$ با سختی بالا (در حدود 900 ویکرز) می‌باشد. در اتصال تیتانیوم و فولاد با استفاده از لایه میانی مس، ساختار اتصال در حوضچه جوش و سطح مشترک حوضچه جوش و فولاد شامل محلول جامد مس و ترکیبات بین فلزی $TiFe_2$ و در سطح مشترک حوضچه جوش و تیتانیوم شامل Ti_2Cu +Ti، TiFe می‌باشد. سختی منطقه جوش در نمونه‌های جوشکاری شده با لایه میانی مس در حدود 400 ویکرز می‌باشد. بیشترین میزان سختی در سطح 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، سختی کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده در ساختار اتصال می‌باشد. نمونه جوشکاری شده با سرعت جوشکاری 0/9 متر بردقیقه و میزان انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر دارای بیشترین استحکام برشی معادل 160 مگاپاسکال بود.

کلمات کلیدی: جوشکاری پرتو الکترونی، فولاد زنگ‌نزن PH4-17، آلیاژTi-6Al-4V ، لایه میانی مس، ریزساختار، خواص مکانیکی.

* پست الکترونیکی: a_khorram@mut.ac.ir

1- مقدمه

با پیشرفت علم و فناوری و توسعه ساخت قطعات، نیاز به بکارگیری مواد با قابلیت‌ها و ویژگی‌های متفاوت مطرح شده است. قابلیت‌هایی نظیر سبکی، استحکام مناسب، مقاومت به خوردگی و حرارت زیاد و قیمت ارزان ویژگی‌هایی هستند که

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

در قالب یک ماده نمی‌گنجد و برای رسیدن به این خصوصیات در یک قطعه نیاز به اتصال مواد غیر هم جنس می‌باشد [1].
فولاد 17-4PH یک فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت شونده مارتنزیتی می‌باشد. استحکام بالا، مقاومت به خوردگی عالی و عملیات حرارتی نسبتاً ساده باعث شده تا فولاد زنگ‌نزن 17-4PH کاربردهای گسترده‌ای در نیروگاه‌های هسته‌ای، صنایع دریایی و هوافضا داشته باشد [2]. آلیاژهای تیتانیوم به علت ویژگی‌های خوب مکانیکی و متالورژیکی در صنایع هوافضا و موتورهای توربینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آلیاژهای تیتانیوم مورد استفاده برای کاربردهای سازه‌ای معمولاً آلیاژهای دو فاز ($\alpha + \beta$) می‌باشند. آلیاژTi-6Al-4V، با شش درصد وزنی آلومینیم به عنوان تثبیت کننده فاز α و چهار درصد وزنی وانادیم به عنوان تثبیت کننده فازβ، به تغییرات ریزساختاری حساس است [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 غیر هم جنس از اختلاف خواص فیزیکی، شیمیایی و متالورژیکی بین دو جزء اتصال و تشکیل احتمالی فاز بین‌فلزی شکننده و درنتیجه کاهش و تخریب خواص مکانیکی جوش به وجود می‌آید[2و3].
جوشکاری پرتو الکترونی به‌عنوان پیشرفته‌ترین روش جوشکاری ذوبی برای اتصال فلزات غیرهمجنس توسعه‌یافته است[1]. این فرایند دارای مزایایی همچون چگالی انرژی بالا، اتمسفر خلأ، پرتو متمرکز، ناحیه متأثر از حرارت کوچک و سرعت بالای جوشکاری می‌باشد. در جوشکاری پرتوالکترونی، 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. [1،4و5]. تینگ و همکاران [6] جوشکاری غیر هم جنس آلیاژ $Ti_6Al_2Mo_2V_2Zr$ 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 هم گسیخته شدند زیرا ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده با سختی بالا مانند TiFe و $TiFe(Cr)_2$ 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 انعطاف پذیر مس با ترکیبات بین فلزی پراکنده TiFe بود. فصل مشترک بین جوش و آلیاژ تیتانیوم از یک لایه بین فلزی نسبتاً انعطاف پذیر 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 می‌باشد.
تینگ و همکاران [7] در تحقیقی دیگر، جوشکاری غیرهمجنس آلیاژ Ti-15-3 و فولاد زنگ‌نزن 304 را بدون لایه میانی و با 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. هنگامی‌که از لایه میانی مس استفاده 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 می‌گردد. این ساختار منجر به یک اتصال بدون ترک می‌شود. می‌توان نتیجه گیری کرد که استفاده از لایه میانی مسی در جوش می‌تواند وضعیت متالورژی اتصال، انعطاف پذیری و چقرمگی اتصال را بهبود بخشد.
وانگ و همکاران [8] 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.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

ترکیبات‌بین‌فلزی$Cu_2Ti+CuTi+CuTi_2$ و TiFe ،$Fe_2Ti+Ni_3Ti+NiTi_2$ در اتصالات جوشکاری شده با مواد پرکننده وانادیوم، نیکل و مس مشاهده می‌شوند. آدوماکو و همکاران [9] از روش‌های جوشکاری پرتو الکترونی، جوشکاری لیزری پیوسته و جوشکاری لیزری پالسی برای اتصال آلیاژTi-6Al-4V و فولاد زنگ‌نزن 17-4PH با لایه میانی وانادیم 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 می شود. توماش چوکو و همکاران [10] 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 Fe_2Ti 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 [11] 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.

وانگ و همکاران [12] از روش جوشکاری پرتو الکترونی برای اتصال تیتانیوم Ti-6-2-2-2 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 می‌شوند و در نمونه جوش‌کاری شده، استحکام کششی 395 مگاپاسکال به دست می آید که 72 درصد استحکام فولاد زنگ نزن 304 می‌باشد. در این پژوهش جوشکاری پرتو الکترونی فولاد رسوب سخت شونده 17-4PH و آلیاژ Ti-6Al-4V بدون لایه میانی و با لایه میانی مس با ضخامت 0/8 میلی‌متر انجام پذیرفت. مطابق تحقیقات صورت پذیرفته، تاکنون اتصال این دو فلز با استفاده از لایه میانی مس انجام نپذیرفته است. از میان مواد پرکننده متفاوت، اغلب ماده پرکننده مس استفاده می‌شود زیرا مس ترکیبات بین فلزی شکننده با آهن، نیکل،کروم و کربن تولید نمی‌کند. همچنین مس یک فلز **انعطاف پذیر** می‌باشد که می‌تواند به راحتی تغییر فرم دهد و تنش‌های ایجاد شده به وسیله عدم تطابق انبساط خطی را آزاد می‌کند. سه متغیر اصلی (آمپر، ولتاژ، سرعت) در جوشکاری پرتو الکترونی وجود دارد. 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. میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش اشعه ایکس، سختی سنجی و آزمون برش جهت ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی مورد استفاده قرار گرفتند.

2- انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق یک میلگرد فولاد رسوب سخت شونده17-4PH به قطر 32 میلی‌متر به‌صورت آنیل شده و یک میلگرد آلیاژ Ti-6Al-4V به قطر 32 میلی‌متر به‌صورت آنیل انحلالی تهیه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

شد. 16 نمونه به طول 30 میلی‌متر توسط دستگاه وایرکات از هریک از مواد اولیه بریده شد.

در جداول (1و2) ترکیب شیمیایی این آلیاژها ارائه شده است. از مس خالص الکترولیتی(OFC) به‌صورت آنیل با ضخامت 0/8 میلی‌متر به‌عنوان لایه واسط (مطابق با استاندارد AMS 4500) استفاده‌شد.

جدول 1- 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	

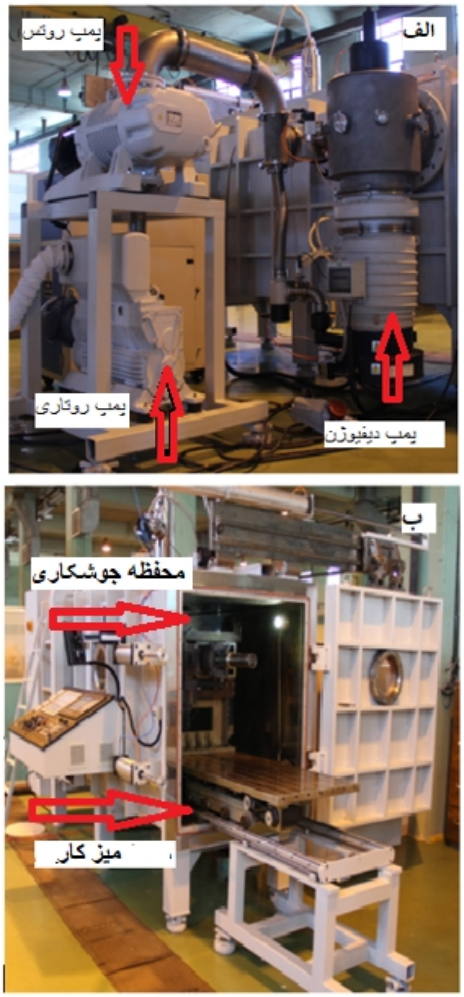
جدول 2- آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه آلیاژ Ti-6Al-4V.

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

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 می‌شوند. 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 اتصال دهی قطعات استفاده‌شد. مقدار خلأ قابل ایجاد در محفظه جوشکاری و محفظه تفنگ الکترونی حدود 5×10^{-5} میلی بار می‌باشد. در شکل(1) دستگاه جوش کاری پرتو الکترونی و همچنین تصویر تجهیزات مربوط به خلأ دستگاه نمایش داده‌شده است. شکل (1-الف) نمایشگر تجهیزات محفظه خلأ می‌باشد. این تجهیزات شامل سه پمپ روتاری، روتس و دیفیوژنی است تا محیط داخل محفظه را بتواند به فشار مناسب خلأ جهت ایجاد پرتو الکترونی برساند. شکل (1-ب) محفظه داخل دستگاه جوشکاری را نشان می‌دهد که این محفظه شامل موارد زیر می‌باشد:

میز کار سه محور، کارگیر قطعه به صورت یک چهار نظام.

در این تحقیق آمپر، ولتاژ، فاصله منبع پرتو تا قطعه کار و ضخامت لایه میانی (0/8 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 جدول (3) پارامترهای تنظیم شده برای آزمایش نشان داده شده است.



شکل 1- دستگاه جوشکاری پرتو الکترونی مورد استفاده در این تحقیق الف- تجهیزات خلأ ب- محفظه داخلی و میز کار.

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 Ti6Al-4V از محلول

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

$22H_2O$-$2HNO_3$-1HF به مدت‌زمان 40 ثانیه و نیز برای اچ فولادPH 17-4 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- پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش.

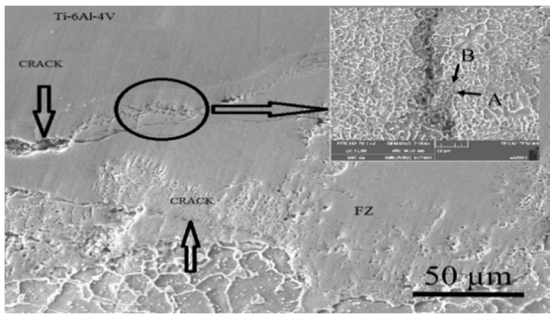
نمونه	سرعت (متر بر دقیقه)	انحراف پرتو(میلی‌متر)	ضخامت لایه میانی (میلی‌متر)
1	0/7	0	بدون لایه واسط
2	0/7	0	0/8
3	0/7	0/2	0/8
4	0/7	0/4	0/8
5	0/7	0/6	0/8
6	0/9	0	0/8
7	0/9	0/2	0/8
8	0/9	0/4	0/8
9	0/9	0/6	0/8

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 استاندارد ASTM D2295-96 ارزیابی شدند. برای این منظور هر یک از نمونه‌های تست برش به صورت استوانه‌هایی به قطر 32 میلی‌متر و طول 30 میلی‌متر بریده شدند.

3- نتایج و بحث

3-1 بررسی ساختار اتصال بدون لایه واسط

به‌منظور بررسی ساختار فصل مشترک اتصال مستقیم فولاد 17-4PH با آلیاژ Ti-6Al-4V، جوشکاری پرتو الکترونی این دو اتصال با ولتاژ 40 کیلوولت، جریان 50 میلی‌آمپر و سرعت 0/7 متر بر دقیقه انجام شد. بعد از اتمام جوشکاری، هنگام خارج کردن قطعات از فیکسچر جوشکاری، اتصال به‌سرعت ازهم‌گسیخته شد. بررسی ریزساختاری جوش برای تجزیه و تحلیل علت این شکست ضروری می‌باشد. در شکل(2) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناشی از کنتراست الکترون‌های برگشتی ارائه شده است. ترک فازهای A و B را با مورفولوژی‌های مختلف طی می‌کند که نشان دهنده مقاومت کم آن‌ها در برابر ترک می‌باشد. به‌منظور بررسی و شناسایی فازهای A وB، آنالیز نقطه‌ایی انجام پذیرفت. نتایج در جدول(4) ارائه شده است. از نمودار فازی دوتایی Fe-Ti و Ti-Cr برای تشخیص این فازها استفاده می‌شود [13]. فاز بلوکی A ترکیبی از $TiFe_2$ می‌باشد که مقداری $TiCr_2$ در آن حل شده است. این فاز ابتدا در طی فرایند انجماد تشکیل می‌شود که احتمالاً به سبب نقطه ذوب بالای آن (حدود 1427 درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. فاز شبیه استخوان ماهی(B) اطراف $TiFe_2$، فاز TiFe می‌باشد که پس از $TiFe_2$تشکیل می‌شود. نقطه ذوب فاز TiFe در حدود 1317 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بنابراین، تغییرات فاز در این منطقه شامل انجماد متجانس $L \rightarrow TiFe_2$ و واکنش پریتکتیک $L + TiFe2 \rightarrow TiFe$ می‌باشد.



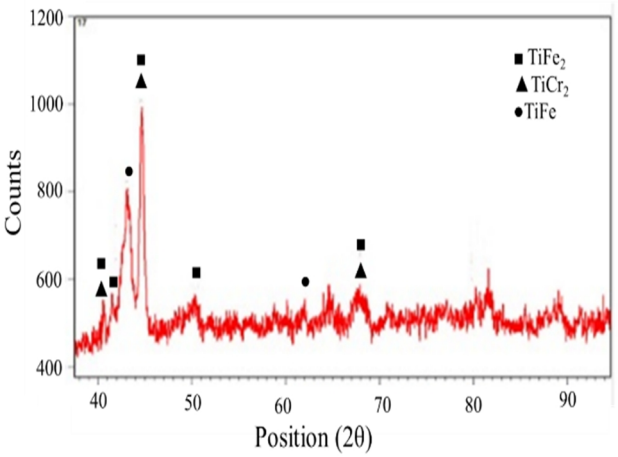
شکل 2- تصویر میکروسکوپی الکترونی ناشی از کنتراست الکترون‌های برگشتی از اتصال مستقیم فولاد 17-4PH به Ti-6Al-4V.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول 4- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل2 برحسب درصد وزنی

مناطق	Fe	Ti	Al	Cr	Ni	V	فازهای تشکیل شده
A	39	32	3/8	19	5	1/2	$TiFe_2$ +$TiCr_2$
B	40/4	39	7/2	8/2	3/5	1/7	TiFe

از آزمون تفرق اشعه ایکس (XRD) برای بررسی دقیق‌تر و آنالیز فازهای تشکیل شده در سطح ترک استفاده شد. همان طور که در شکل (3) مشاهده می‌شود فازهای مضر $TiFe_2$،TiFe و $TiCr_2$در اتصال ایجادشده است که با اطلاعات به‌دست‌آمده از آنالیز نقطه‌ایی مطابقت دارد. شدت پیک پراش نشان می‌دهد که ترک به صورت عمده در ناحیه غنی از $TiFe_2$ وجود دارد.



شکل 3- الگوی پراش اشعه ایکس فصل مشترک اتصال مستقیم فولاد 17-4PH به Ti-6Al-4V.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در اتصال مستقیم Ti-6Al-4V و فولاد 17-4PH، منطقه جوشکاری متشکل از ترکیبات بین فلزی TiFe و $TiFe_2$ می‌باشد. از آنجایی که ترکیبات بین‌فلزی تشکیل‌شده بسیار ترد و شکننده می‌باشند تحمل تنش‌های حرارتی را نداشته و به‌سرعت پس از تشکیل ترک، به رشد خود ادامه می‌دهند و جدایش اتفاق می‌افتد. بنابراین برای ایجاد یک اتصال بادوام‌تر، استفاده از عنصر سوم به‌عنوان لایه واسط جهت تغییر ترکیب شیمیایی حوضچه جوش و کاهش یا حذف تشکیل ترکیبات بین‌فلزی در حوضچه مذاب لازم و ضروری می‌باشد.

2-3 بررسی ساختار اتصال با استفاده از لایه واسط مس

3-2-1 تاثیر انحراف پرتو بر ریزساختار اتصال در سرعت 0/7 متر بر دقیقه

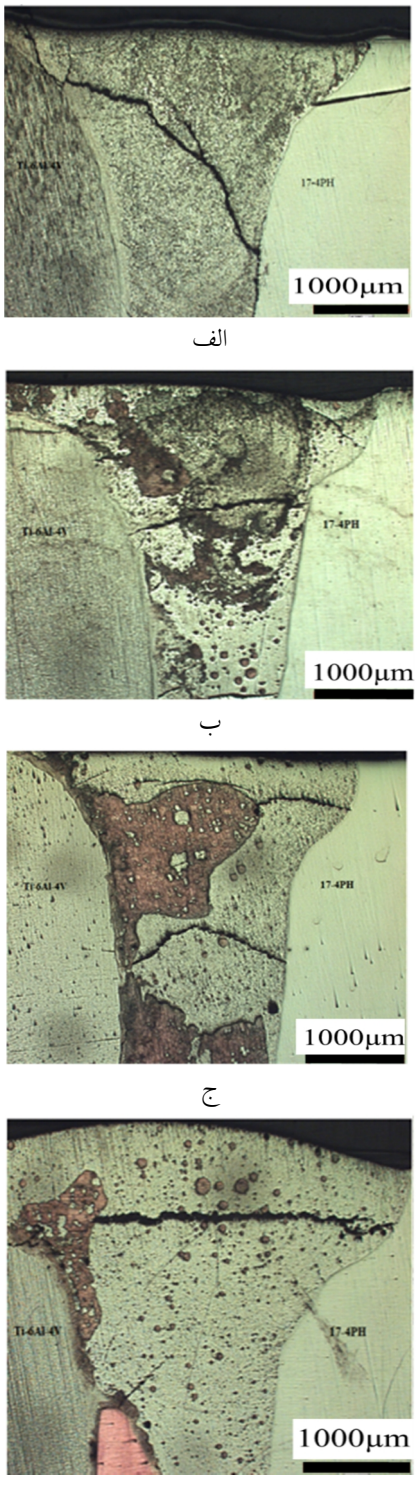
در این بخش به بررسی ریزساختار و ترکیب شیمیایی اتصال در سرعت 0/7 متر بر دقیقه با چهار مقدار انحراف پرتو 0، 0/2، 0/4 و 0/6 میلی‌متر پرداخته می‌شود. در شکل(4) سطح مقطع اتصال این دو آلیاژ برای مقادیر مختلف انحراف پرتو نشان داده‌شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر، مقدار کمی از لایه مس ذوب نشده در انتهای جوش باقی می‌ماند که به علت اتلاف شدید حرارت به دلیل رسانایی حرارتی بسیار بالای مس می‌باشد. می‌توان این عیب جوش را به عنوان یک ذوب ناقص در نظر گرفت.

هرچند انحراف پرتو ایجادشده به سمت فولاد باید باعث وارد شدن کمتر تیتانیوم به حوضچه جوش شده و از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی بکاهد، اما تصاویر به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که هنوز ترکیبات بین‌فلزی در حوضچه جوش به صورت پراکنده وجود دارند و باعث ایجاد ترک و جدایش در منطقه جوشکاری شده اند. برای مشخص شدن این موضوع، ترکیبات و فازهای ایجادشده در حوضچه جوش با استفاده از SEM-EDS مورد بررسی قرار گرفتند. از نمودارهای فازی دوتایی Cu-Fe و Fe-Ti و نمودار فازی سه تایی Ti-Fe-Cu برای بررسی این فازها و واکنش‌های متالورژیکی در طول انجماد استفاده می شود [14-16].

همان طور که در شکل (5) مشاهده می‌شود ترکیبات بین فلزی ایجاد شده در حوضچه جوش باعث بروز ترک در منطقه جوش شده اند. به دلیل ساختار پیوسته این ترکیبات در کل جوش و عدم توزیع یکنواخت عناصر اصلی، این جدایش اتفاق افتاده است. با توجه به شروع ترک‌ها از فصل مشترک بین حوضچه جوش و فولاد، ترکیبات شیمیایی فازهای مختلف در این منطقه در انحراف پرتوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت (جدول 5). همان طور که مشاهده می‌شود در انحراف پرتوهای 0 و 0/2 میلی‌متر، فصل مشترک شامل ترکیب بین فلزی $TiFe_2$ و در انحراف پرتوهای 0/4 و 0/6 میلی‌متر، فصل مشترک شامل

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

محلول جامد مس با ترکیبات بین فلزی $TiFe_2$ توزیع شده در آن می‌باشد.



شکل4-تصویر میکروسکوپی 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.

این نوع ساختار را می توان یک کامپوزیت زمینه مسی تقویت شده با ترکیبات بین فلزی در نظر گرفت. واکنش متالورژیکی نسبتاً ساده می‌باشد. طبق نمودارهای تعادلی، فاز$TiFe_2$ در ابتدا جوانه می‌زند 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 می شود.

با مقایسه درصد وزنی عناصر مشهود است که مقادیر تیتانیوم و آهن به پارامترهای جوشکاری بستگی دارد. با انحراف پرتو جوشکاری از مرکز جوش به سمت فولاد سعی می‌شود تا درصد وزنی ترکیب 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.

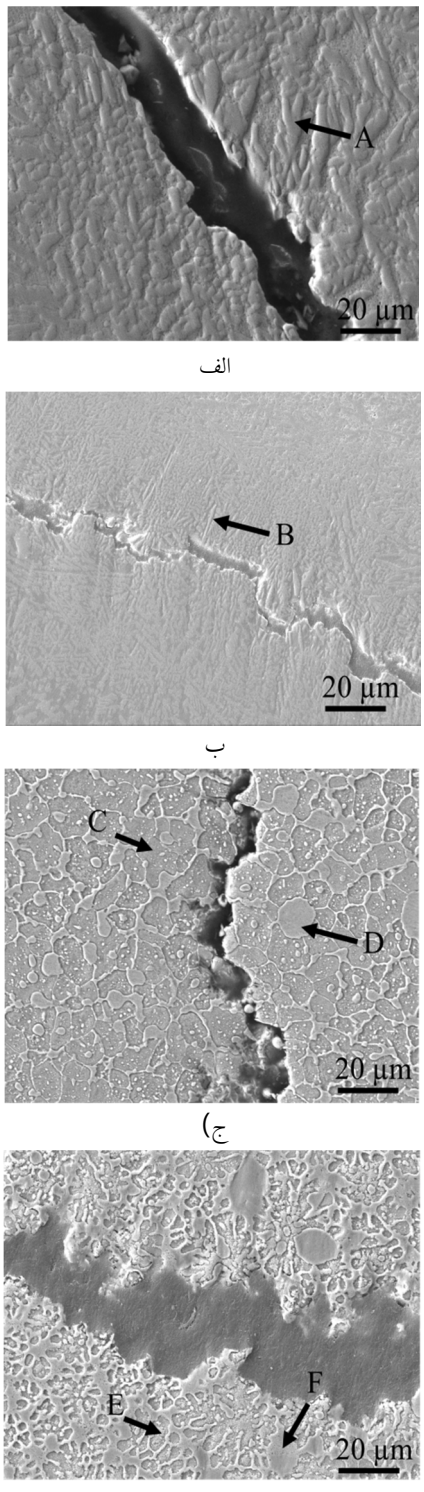
جدول5- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل 5 برحسب درصد وزنی

انحراف پرتو (میلی‌متر)	مناطق	Fe	Ti	Cu	Cr	فازهای تشکیل‌شده
0	A	53	26/6	4/6	12/8	$TiFe_2$
0/2	B	55/5	22/2	8/2	11/1	$TiFe_2$
0/4	C	58/8	14/5	10/8	12/9	Fe+ $TiFe_2$
0/4	D	15	9	74	2	Cu(SS)
0/6	E	61/3	13/1	11/4	11/2	Fe+ $TiFe_2$
0/6	F	18	6	72	4	Cu(SS)

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 است، درحالی‌که سرعت جوشکاری بیشتر بر طول حوضچه جوش تاثیر می‌گذارد و به همین ترتیب، عمر حوضچه جوش را تعریف می‌کند. در این پژوهش برای تغییر ترکیب حوضچه جوش، چهارمقدار مختلف جابجایی پرتو از خط وسط جوش و دو مقدار

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

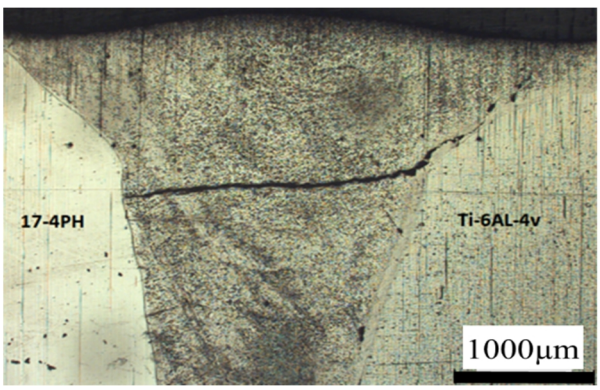
سرعت خطی استفاده شد.



شکل 5- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع اتصال 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.

2-2-3 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 می‌شود و انحراف پرتو مانند قسمت قبلی در چهار مقدار مشخص‌شده در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل(6) مشاهده می‌شود ترک در عرض سطح مقطع اتصال در انحراف پرتو صفر ایجادشده است. با افزایش سرعت جوشکاری از 0/7 به 0/9 متر بر دقیقه انتظار می‌رود که عمر حوضچه مذاب کوتاه‌تر گردد و نسبت ترکیب عناصر تیتانیوم و آهن به حداقل برسد و از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی کاسته شود اما به علت انحراف پرتو صفر، نسبت بین این دو عنصر (آهن و تیتانیوم) به‌خوبی کنترل نشده است و فازهای ترد بین فلزی در زمینه تشکیل شده‌اند که باعث شروع ترک و جدایش از مرز بین حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم به سمت مرکز جوش شده‌اند.



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

ریزساختار جوش نزدیک به آلیاژ تیتانیوم در شکل(7) نشان داده شده است. همان طور که در شکل(7-الف و 7-ب) (انحراف پرتوهای 0 و 0/2 میلی‌متر) مشاهده می شود در فصل مشترک اتصال ساختار دندریتی تشکیل شده است. این ساختار بیانگر فاز ترد و شکننده $TiFe_2$ می‌باشد که در حین انجماد سریع تیتانیوم شکل گرفته است. در انحراف پرتوهای 0/4 و 0/6

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

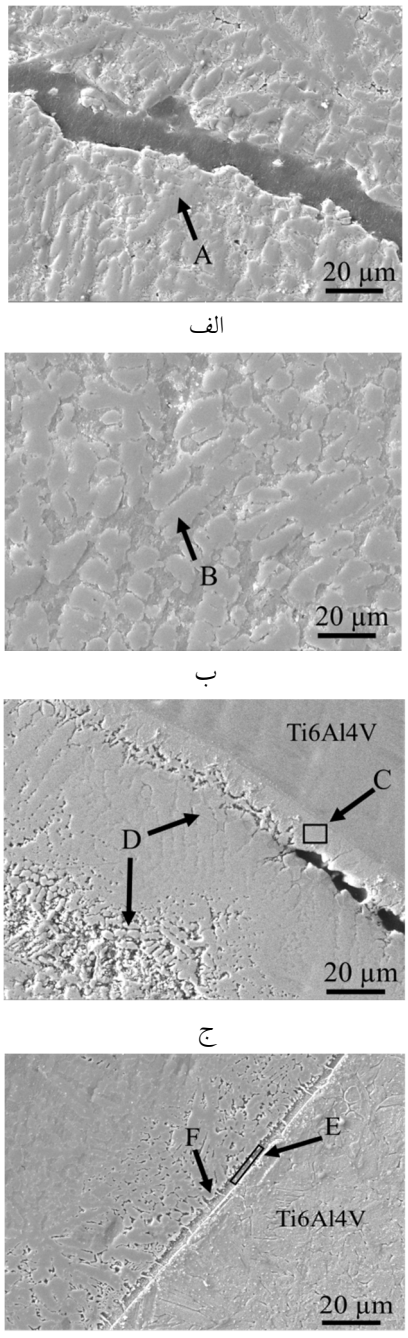
میلی‌متر، فصل مشترک اتصال شامل ترکیبات بین‌فلزی $Ti+ Ti_2Cu$ و TiFe می‌باشد. همان طور که در شکل(7-ج و 7-د) مشاهده می‌شود یک لایه واکنشی روشن در اطراف آلیاژ تیتانیوم (منطقه Cو E) وجود دارد و واکنش یوتکتوئید-β-Ti→α-$Ti+Ti_2Cu$در این ناحیه رخ داده است. بنابراین، این منطقه از محلول جامد تیتانیوم با مقداری Ti_2Cu در آن تشکیل شده است. فازهای به شکل استخوان ماهی که در شکل (7-ج) مشاهده می‌شود ترکیبات بین فلزی TiFe می‌باشند. هرچند با انحراف پرتو به سمت فولاد سعی شده است که نسبت بین عنصر آهن و تیتانیوم در حوضچه جوش کنترل شود ولی بااین‌وجود، هنوز ترک‌ها به طور کامل حذف نشده‌اند اما به مقدار قابل‌توجهی کاهش یافته‌اند.

در جدول(6) ترکیب شیمیایی فازهای مختلف 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 می شود.

جدول6- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل7 برحسب درصد وزنی.

انحراف پرتو (میلی‌متر)	مناطق	Fe	Ti	Cu	Cr	فازهای تشکیل‌شده
0	A	55/2	23/2	5/8	13/8	$TiFe_2$
0/2	B	56/3	19/3	9/1	13/3	$TiFe_2$
0/4	C	8/4	74/6	13/7	3/3	$Ti+ Ti_2Cu$
0/4	D	40/3	34/4	10/8	5/5	TiFe
0/6	E	14/2	67/1	15/3	3/4	$Ti+ Ti_2Cu$
0/6	F	43/2	39/1	12/4	5/3	TiFe

برای بررسی فازهای تشکیل شده، با در نظر گرفتن دمای تشکیل فازها (مس، آهن و ترکیبات بین‌فلزی) نتیجه‌گیری می‌شود که فصل مشترک تیتانیوم و منطقه مذاب در پایان منجمد می‌شود؛ بنابراین، تبلور محلول‌های جامد γ-Fe و مس موانعی را برای حرکت عناصر فولادی از سمت منطقه مذاب ایجاد می‌کند و بنابراین، انجماد حوضچه جوش از سمت آلیاژ تیتانیوم شروع می‌شود.



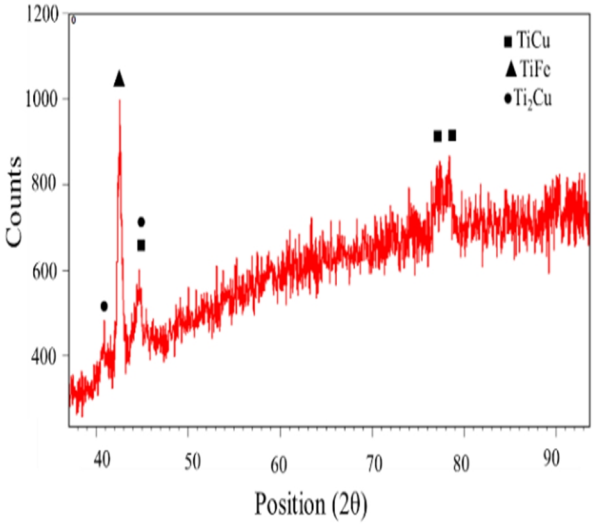
شکل7-تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع
الف- انحراف پرتو صفر ب- اتصال با سرعت 0/9 متر بر دقیقه
انحراف پرتو 0/2 میلی‌متر ج- انحراف پرتو 0/4 میلی‌متر
د- انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

شکل‌گیری فازهای موجود می‌تواند با واکنش‌های موضعی زیر توضیح داده شود:

$L+\alpha\text{-}Ti \rightarrow TiFe+Ti_2Cu$ (990°C)
$L+Ti_2Cu \rightarrow TiFe+CuTi$ (950°C)

همان طور که در شکل (8) مشاهده می‌شود ترکیبات بین فلزی مضر TiFe و Ti_2Cu در میزان انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر ایجاد شده است که با اطلاعات به دست آمده از آنالیز نقطه‌ای مطابقت دارد. شدت پیک پراش نشان می‌دهد که ترک به طور عمده در ناحیه غنی از TiFe وجود دارد. عامل اصلی ایجاد ترک‌ها در حوضچه جوش یا مرز بین حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم همین ترکیبات بین‌فلزی می‌باشد که به‌صورت پیوسته در کل جوش پرکنده شده اند.



شکل 8-الگوی پراش اشعه ایکس از سطح مقطع اتصال با سرعت جوشکاری 0/9 متر بر دقیقه و میزان انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر به سمت تیتانیوم.

افزایش سرعت جوشکاری منجر به کاهش ذوب آلیاژ تیتانیوم و همچنین افزایش مقدار عناصر فولاد می‌شود. با توجه به افزایش سرعت جوش و انحراف‌های پرتو ایجادشده، اگرچه کاهش ترک‌ها و جدایش در منطقه جوش مشاهده می‌شود ولی ترک‌ها به‌طورکلی حذف نشده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که لایه واسط به ضخامت 0/8 میلی‌متر نتوانسته است در جلوگیری از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی بسیار موثر باشد.

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 فلزپایه 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.

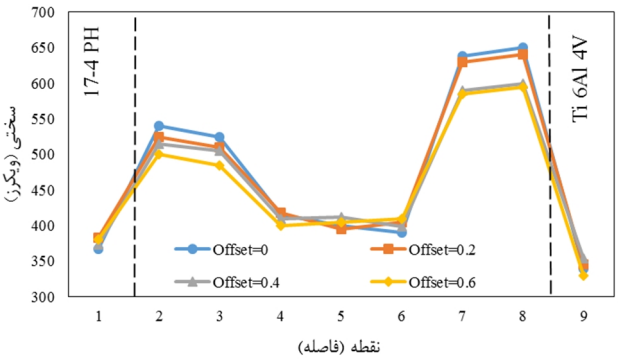
در نمونه جوشکاری شده بدون لایه میانی مس، سختی منطقه جوش در حدود 900 ویکرز می‌باشد. همان‌طور که از پروفیل میکروسختی در شکل(9) مشاهده می‌شود، میکروسختی در منطقه جوش با لایه میانی مس به دلیل انعطاف پذیری بالای مس کاهش می‌یابد. بیشترین میزان سختی در سطح مشترک حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم و همچنین در سطح مشترک حوضچه جوش و فولاد مشاهده می‌شود که به سبب حضور ترکیبات بین فلزی با سختی بالا در این مناطق می‌باشد.

در نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت 0/7 متر بر دقیقه و انحراف پرتو صفر و 0/2، ترکیب بین فلزی $TiFe_2$ با سختی بالا در اتصال وجود دارد. حضور فازهای ترد و شکننده علت اصلی افزایش سختی در مرز بین حوضچه جوش و تیتانیوم و ایجاد ترک در سرتاسر جوش می‌باشد. در شکل(5) این ترک‌ها به‌وضوح قابل‌مشاهده می‌باشند. در نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت 0/7 متر بر دقیقه و انحراف پرتو 0/4 و 0/6 میلی‌متر، میزان سختی کاهش یافته است. واضح است که ریزساختار $Fe+TiFe_2$ و Cu(SS) می‌تواند سختی منطقه جوشکاری شده را کاهش دهد [6].

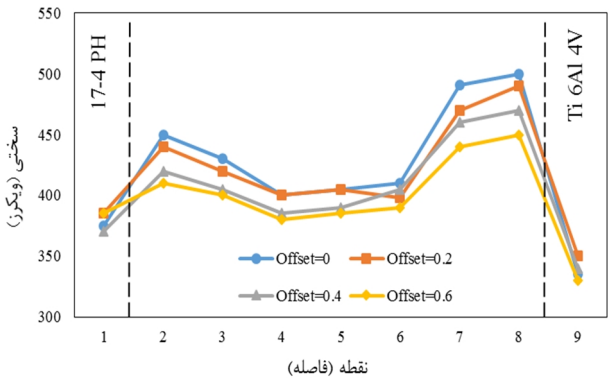
بیشترین میزان میکروسختی در فصل مشترک بین حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم مشاهده می‌شود. بنابراین پلاستیسیته این منطقه کمترین مقدار می‌باشد. از افزایش پیک سختی‌ها در فصل مشترک بین حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم مشخص می‌شود که

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

ترکیبات بین فلزی حذف نشده‌اند و باید با افزایش سرعت جوشکاری، عمر حوضچه جوش را کاهش و سرعت سرمایش را افزایش داد تا فرصت جهت تشکیل این ترکیبات به حداقل برسد و از میزان آن‌ها کاسته شود. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت جوشکاری از 0/7 متر بر دقیقه به 0/9 متر بر دقیقه، سختی کاهش یافته است که موید کاهش ترکیبات بین فلزی در منطقه اتصال می‌باشد. در انحراف پرتو صفر و 0/2 میلی‌متر، سختی در حدود 400 ویکرز مشاهده می‌شود 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 Ti_2Cu سبب می‌شود که سختی به شدت کاهش یابد. فاز Ti_2Cu محصول واکنش یوتکتیک $L \rightarrow Ti_2Cu + TiCu$ می‌باشد و طبق نمودار تعادلی تیتانیوم-مس، یک ترکیب بین فلزی است ولی این فاز سختی و تردی به مراتب پایین‌تری از فاز TiFeدارد [7]. در نتیجه انعطاف‌پذیری اتصال به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد.



الف



ب

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

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.

نمونه جوشکاری شده با سرعت جوشکاری 0/9 متر بردقیقه و میزان انحراف پرتو 0/6 میلی‌متر دارای بیشترین استحکام برشی معادل 160 مگاپاسکال بود. شکست در تمامی نمونه‌ها از فصل مشترک حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم اتفاق افتاد که این مشخص می‌کند ضعیف‌ترین ناحیه در جوش، این فصل مشترک است و دلیل آن این است که ترکیبات بین‌فلزی ترد و شکننده از حوضچه مذاب و بخصوص 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 دارد.

این مورد منجر به دستیابی یک اتصال بهتر می‌شود. تأثیر افزایش سرعت و انحراف پرتو به سمت فولاد در کیفیت اتصال نمونه‌های جوشکاری شده قابل‌مشاهده می‌باشد ولی هنوز با جوش ایده‌آل فاصله وجود دارد. بنابراین در کار آتی، ضخامت لایه واسط افزایش خواهد یافت تا یک اتصال بدون ترکیبات بین فلزی ایجاد شود.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جوشکاری پرتو الکترونی فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت شونده 17-4PH و آلیاژTi-6Al-4V بدون لایه واسط و با لایه میانی مس با ضخامت 0/8 میلی‌متر انجام پذیرفت و تأثیر پارامترهای جوشکاری بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال حاضر 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 آزمایش‌های استفاده شد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل می باشد:

- در امتزاج مستقیم تیتانیوم و فولاد، ساختار اتصال متشکل از ترکیبات بین فلزی TiFe و $TiFe_2$ +$TiCr_2$ می‌باشد. این ترکیبات بین فلزی تشکیل شده بسیار ترد و شکننده می‌باشند و تحمل تنش‌های حرارتی را نداشته و به سرعت پس از تشکیل ترک، سبب ایجاد جدایش می شوند.

- استفاده از لایه واسط با ضخامت 8/0 میلی‌متر، سبب کاهش ترک‌ها می‌شود ولی منجر به حذف کامل آن‌ها نمی‌گردد.

- در نمونه جوشکاری شده بدون لایه میانی مس، سختی منطقه جوش در حدود 900 ویکرز و در نمونه‌های جوشکاری شده با لایه میانی مس در حدود 400 ویکرز می‌باشد. بیشترین میزان سختی در سطح 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، سختی کاهش می یابد که به دلیل کاهش ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده در ساختار اتصال می‌باشد.

- در اتصال تیتانیوم و فولاد با استفاده از لایه میانی مس، ساختار اتصال در حوضچه جوش و سطح مشترک حوضچه جوش و فولاد شامل محلول جامد مس و ترکیبات بین فلزی $TiFe_2$ و در سطح مشترک حوضچه جوش و تیتانیوم شامل Ti+ Ti_2Cu و TiFe می‌باشد.

- نمونه جوشکاری شده با سرعت جوشکاری 9/0 متر بردقیقه و میزان انحراف پرتو 6/0 میلی‌متر دارای بیشترین استحکام برشی معادل 160 مگاپاسکال بود. شکست در تمامی نمونه‌ها در فصل مشترک حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم اتفاق افتاد که نشان می‌دهد ضعیف‌ترین ناحیه در جوش، این فصل مشترک است.

منابع

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

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

3- 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.

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., 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,

7- 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.

8- 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.

9- 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.

10- 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.

11- 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.

12- 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.

13- Pardal, G., Ganguly, S., Williams, S., Vaja, J., "Dissimilar metal joining of stainless steel and titanium using copper as transition metal". *Int J Adv Manuf Technol.* vol.86: 1139-1150, 2016.

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

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

16- 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 iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]