

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 Ti₆Al₄V 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, 0.2)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 TiFe2+TiCr2 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 TiFe₂ intermetallic compounds, and at the interface between the weld pool and titanium includes Ti+Ti₂Cu 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: <u>a khorram@mut.ac.ir</u>



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

علی مهدوی شاکر، حسین مومنی، علی خرم ^{*} ایرضا یزدی پور دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، تهران.

دريافت مقاله: 1401/10/20 ؛ پذيرش مقاله: 1401/12/18

چکیدہ

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-6AI-4V میباشد. برای این منظور، جوشکاری این دو آلیاژ بدون لایه واسط و با لایه میانی مس با ضخامت 0/8 میلی متر انجام شد. دو سرعت جوشکاری مختلف 7/0 و 9/0 متر بر دقیقه با چهار میزان انحراف پرتو (0. 2/0. 2/4 و 6/0 میلی متر) از مرکز لایه میانی به سمت فولاد برای انجام آزمایش های استفاده شد. نتایج نشان میدهد که در امتزاج مستقیم تیتانیوم و فولاد، ساختار اتصال متشکل از ترکیبات بین فلزی TiFe و TiFe 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 و در سطح مشترک حوضچه جوش و سطح مشترک حوضچه جوش و فولاد شامل محلول جامد مس و ترکیبات بین فلزی مشترک میانی مس در حدود 400 ویکرز میباشد. بیشترین میزان سختی در سطح مشترک حوضچه جوش و فولاد با استفاده با ایه میانی مس در حدود 400 ویکرز میباشد. بیشترین میزان سختی در سطح مشترک حوضچه جوش و فولاد شامل محلول مین در نمونه های سرعت بوشکاری و میزان انحراف پرتو، میباشد. بیشترین میزان سختی در سطح مشترک حوضچه جوش و میان در این میباشد. با افزایش سرعت در جوشکاری و میزان انحراف پرتو، میباشد. میشترین میزان سختی در سطح مشترک مینه و میباشد در این مناطق میباشد. با افزایش سرعت 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 شکنده در ساختار اتصال میباشد. نمونه جوشکاری شده با سرعت جوشکاری 9/0 متر بردقیقه و میزان انحراف پرتو 6/0 میلیمتر دارای بیشترین استحکام برشی معادل می

كلمات كليدى: جوشكارى پرتو الكترونى، فولاد زنگنزن PH4-17، آلياژTi-6Al-4V، لايه ميانى مس، ريزساختار، خواص مكانيكي.

🗟 * پست الكترونيكي: <u>a khorram@mut.ac.ir</u>

1- مق*د*مه

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

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 يک فولاد زنگنزن رسوب سخت شونده مارتنزیتی میباشد. استحکام بالا، مقاومت به خوردگی عالی و عمليات حرارتي 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 می گیرند. آلیاژهای تیتانیوم مورد استفاده برای کاربردهای سازهای معمولاً آلیاژهای دو فاز (α + β) می باشند. آلیاژTi-6Al-4V، با شش درصد وزنی آلومينيم به عنوان تثبيت كننده فاز α و چهار درصد وزني واناديم به عنوان تثبیت کننده فازβ، به تغییرات ریزساختاری حساس است [3]. مشكلات مربوط به جوشكاري غير هم جنس فولاد رسوب سخت شونده Ti-6Al-4V و آلياژTi-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 مكانيكي جوش به وجود ميآيد[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 Ti₆Al₂Mo₂V₂Zr 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 II- 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 نمی توانند با روش جوشکاری پر توالکترونی بدون استفاده از لایه میانی مس جوش داده شوند. هنگامی که از لایه میانی مس استفاده نمی شود ترکیبات بین فلزی Ti-Fe به طور پیوسته در حوضچه جوش توزیع می شوند که باعث تردی زیاد اتصال می شوند به طوری که اتصال تحت تنش نسبتا کم ترک می خورد. هنگامی که از یک لایه میانی مس استفاده می شود مناطق داخل فلزی LiFe که به طور یکنواخت در آن توزیع شده است فلزی می ترک می گردد. این ساختار منجر به یک اتصال بدون ترک می شود. می توان نتیجه گیری کرد که استفاده از لایه میانی مسی در جوش می تواند 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.

تركيبات بين فلزى دِTiFe Fe2Ti+Ni3Ti+NiTi و Cu2Ti+CuTi+CuTi در اتصالات جوشکاری شده با مواد پرکننده وانادیوم، نیکل و مس مشاهده می شوند. آدوماکو و همکاران [9] از روش های 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. واناديوم اتصال مناسبي با تيتانيوم ايجاد ميكند و در منطقه جوش نزدیک تیتانیوم، محلول جامد (βTi,V) مشاهده می شود. در منطقه جوش نزدیک فولاد، فازهای مشابه (Fe,V)ss) با ترکیبات مختلف دیده می شود. توماش چوکو و همکاران [10] ريزساختار و خواص مكانيكي اتصال بين ألياژ -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 می تواند به دست آید. انحراف پرتو به سمت تیتانیوم منجر به تشکیل مقدار قابل توجهی فاز Fe₂Ti می شود. انحراف پرتو به سمت فولاد از ذوب تیتانیوم و تشکیل ترکیبات بین فلزی شکننده در سطح مشترک تیتانیوم-منطقه مذاب جلو گیری می کند. استحکام اتصال به میزان ترکیبات بین فلزى بستگى دارد. بالاترين مقادير استحكام نهايي (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 لايه مياني مي شوند. استحكام كششي

اتصال به شکنندگی لایه FeTi ،α-Ti و CuTi نزدیک تیتانیوم محدود می شود.

وانگ و همکاران [12] از روش جوشکاری پرتو الکترونی برای اتصال تیتانیوم 2-2-2-Ti-6 و فولاد زنگ نزن 304 با لایه میانی کامپوزیتی V/Cu-V استقاده 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 جوش کاری شده، استحکام کششی 395 مگاپاسکال به دست می آید که 72 درصد استحکام فولاد زنگ نزن 304 می باشد. در این پژوهش جوشکاری پرتو الکترونی فولاد رسوب سخت شونده 17-4PH و آلیاژ Ti-6Al-4V بدون لایه میانی و با لایه مياني مس با ضخامت 0/8 ميليمتر انجام پذيرفت. مطابق تحقيقات صورت پذيرفته، تاكنون اتصال اين دو فلز با استفاده از لایه میانی مس انجام نپذیرفته است. از میان مواد پرکننده متفاوت، اغلب ماده پرکننده مس استفاده می شود زیرا مس ترکیبات بین فلزی شکننده با آهن، نیکل،کروم و کربن تولید نمىكند. همچنين مس يک فلز انعطاف پذير مىباشد كه می تواند به راحتی تغییر فرم دهد و تنشهای ایجاد شده به وسيله عدم تطابق انبساط خطى را آزاد مىكند. سه متغير اصلى (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 ميزان انحراف پرتو (0، 0/2، 4/4 و 0/6 ميليمتر) از مركز لايه 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 شونده 17-4PH به قطر 32 میلیمتر به صورت آنیل شده و یک میلگرد آلیاژ Ti-6Al-4V به قطر 32 میلیمتر به صورت آنیل انحلالی تهیه

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 8/0 میلیمتر بهعنوان لایه واسط (مطابق با استاندارد AMS (4500) استفاده شد.

جدول 1- أناليز تركيب شيميايي نمونه فولاد رسوب سخت شونده 17-4PH.

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

جدول 2- أناليز تركيب شيميايي نمونه ألياژ Ti-6Al-4V.

Α	1	V	Fe	0	С	Ti
6/4	1	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 نمونه های 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 جريان 250 ميليآمير و ولتاژ 60 كيلوولت براي اتصال دهي قطعات استفاده شد. مقدار خلاً 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 تجهيزات مربوط به خلأ دستگاه نمايش دادهشده است. شكل (1-الف) نمایشگر تجهیزات محفظه خلاً می باشد. این تجهیزات شامل سه پمپ روتاری، روتس و دیفیوژنی است تا محیط داخل محفظه را بتواند به فشار مناسب خلأ جهت ايجاد پرتو الكتروني 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، 2/0، 4/4 و 0/6 میلیمتر) بهعنوان پارامترهای متغیر انتخاب شدهاند. 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 به منظور بررسی ریز ساختار و فازهای تشکیل شده، سطح مقطع نمونه ها در راستای طولی توسط وایرکات برش داده شد. بعد از انجام مراحل آماده سازی نمونه ها، هر یک از فلزات پایه به صورت جداگانه اچ شدند. به همین منظور برای اچ آلیاژ تیتانیوم Ti6Al-4V از محلول

1HF - 22H2O-2HNO3-1HF به مدتزمان 40 ثانیه و نیز برای اچ فولاد PH - 11 از محلول 3HCI-1HNO3 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 به کارگیری کنتراست الکترونهای برگشتی مورد مطالعه قرار گرفتند. برای بررسی آنالیز فازهای موجود در ریزساختار از دستگاه پراش اشعه ایکس مدل 6000 مساد جهت تفسیر و تعیین 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	انحراف	ضخامت لايه مياني
	(متر بر دقيقه)	پر تو (میلی متر)	(ميلى متر)
1	0/7	0	بدون لايه 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 may way Easy بر مبنای ویکرز اندازه گیری شد. برای این منظور فرورونده ای 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 تعیین کننده استحکام اتصالهای ایجادشده به روش جوشکاری پرتو الکترونی، ترکهای باقی مانده در فصل مشترک اتصال و همچنین میزان برشی نمونه های متصل شده در دمای اتاق طبق استاندارد برشی نمونه های متصل شده در دمای این منظور هر یک از نمونه های تست برش به صورت استوانه هایی به قطر

32 میلیمتر و طول 30 میلیمتر بریده شدند.

3- نتايج و بحث

1-3 بررسى ساختار اتصال بدون لايه واسط

بهمنظور بررسى ساختار فصل مشترك اتصال مستقيم فولاد 17-4PH با آلياژ Ti-6Al-4V، جوشكارى پرتو الكتروني اين دو اتصال با ولتاژ 40 كيلوولت، جريان 50 ميلي آمپر و سرعت 0/7 متر بر دقيقه انجام شد. بعد از اتمام جوشكاري، هنگام خارج كردن قطعات از فيكسچر جوشكاري، 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 مي شود [13]. فاز بلوكي A تركيبي از TiFe2 مي باشد كه مقداری TiCr₂ در آن حل شده است. این فاز ابتدا در طی فرايند انجماد تشكيل مىشود كه احتمالاً به سبب نقطه ذوب بالای آن (حدود 1427 درجه سانتی گراد) می باشد. فاز شبیه استخوان ماهی(B) اطراف TiFe، فاز TiFe میباشد که پس از TiFe₂ تشكيل مي شود. نقطه ذوب فاز TiFe در حدود TiFe درجه سانتی گراد می باشد. بنابر این، تغییر ات فاز در این منطقه شامل انجماد متجانس L→TiFe₂ و واكنش پريتكتيك مى باشد. $L + TiFe2 \rightarrow TiFe$



برگشتی از اتصال مستقیم فولاد 17-4PH به Ti-6Al-4V.

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

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

از آزمون تفرق اشعه ایکس (XRD) برای بررسی دقیق تر و آنالیز فازهای تشکیل شده در سطح ترک استفاده شد. همان طور که در شکل (3) مشاهده می شود فازهای مضر TiFe₂.TiFe و TiCr₂ اتصال ایجادشده است که با اطلاعات به دست آمده از آنالیز نقطه ایی مطابقت دارد. شدت پیک پراش نشان می دهد که ترک به صورت عمده در ناحیه غنی از TiFe وجود دارد.



بنابراین می توان نتیجه گرفت در اتصال مستقیم Ti-6Al-4V و فولاد HT-4PH، منطقه جوشکاری متشکل از ترکیبات بین فلزی TiFe می TiFe می باشد. از آنجایی که ترکیبات بین فلزی تشکیل شده بسیار ترد و شکننده می باشند تحمل تنش های حرارتی را نداشته و به سرعت پس از تشکیل ترک، به رشد خود ادامه می دهند و جدایش اتفاق می افتد. بنابراین برای ایجاد یک اتصال بادوامتر، استفاده از عنصر سوم به عنوان لایه واسط جهت تغییر ترکیب شیمیایی حوضچه جوش و کاهش یا حذف تشکیل ترکیبات بین فلزی در حوضچه مذاب لازم و ضروری می باشد.

3-2 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 7/0 متر بر دقیقه با چهار مقدار انحراف پرتو 0، 2/0، 4/0 و 6/0 میلیمتر پرداخته میشود. در شکل(4) سطح مقطع اتصال این دو آلیاژ برای مقادیر مختلف انحراف پرتو نشان داده شده 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 به دست آمده نشان می دهد که هنوز ترکیبات بینفلزی در حوضچه جوش به صورت پراکنده وجود دارند و باعث ایجاد ترک و جدایش در منطقه پراکنده وجود دارند و باعث ایجاد ترک و جدایش در منطقه وراکنده و جود دارند و باعث ایجاد ترک و مدایش در منطقه و فازهای ایجادشده در حوضچه جوش با استفاده از و فازهای ایجادشده در حوضچه جوش با استفاده از دو تایی SEM-EDS و نمودار فازی سه تایی Ti-Fe-Cu برای بررسی این فازها و واکنش های متالورژیکی در طول انجماد استفاده می شود [16-14].

همان طور که در شکل (5) مشاهده می شود 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 می شود در انحراف پرتوهای 0 و 2/0 میلی متر، فصل مشترک شامل ترکیب بین فلزی TiFe₂ و در انحراف پرتوهای 4/0 و 6/0 میلی متر، فصل مشترک شامل

آن می باشد. 1000µm الف 1000µm 1000µm

محلول جامد مس با ترکیبات بین فلزی TiFe₂ توزیع شده در

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.

1000µm

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، فاز2TiFe در ابتدا جوانه میزند و در حین خنک کاری به علت دمای بالای ذوب آن (1427 درجه سانتی گراد) در مقایسه با مس (1083 درجه سانتی گراد) 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 می شود 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- آناليز نواحي نشان داده شده در شکل 5

برحسب درصد وزنى								
انحراف	مناطق	Fe	Ti	Cu	Cr			
						فازهای		
پرىو						تشكيل شده		
(میلیمتر)								
0	А	53	26/6	4/6	12/8	TiFe ₂		
0/2	В	55/5	22/2	8/2	11/1	TiFe ₂		
0/4	С	58/8	14/5	10/8	12/9	Fe+ TiFe ₂		
0/4	D	15	9	74	2	Cu(SS)		
0/6	Е	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

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.

3-2-2 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 900 متر بر دقیقه انتخاب میشود و انحراف پرتو مانند قسمت قبلی در چهار مقدار مشخص شده در نظر گرفته شد. همان طور که در شکل (6) مشاهده می شود ترک در عرض سطح مقطع اتصال در انحراف پرتو صفر ایجادشده است. با افزایش سرعت جوشکاری از 7/7 به 9/0 متر بر دقیقه انتظار می دود که عمر حوضچه مذاب کوتاه تر گردد و نسبت ترکیب عناصر تیتانیوم و آهن به حداقل انحراف پرتو صفر، نسبت بین این دو عنصر (آهن و تیتانیوم) به خوبی کنترل نشده است و فازهای ترد بین فلزی در زمینه تشکیل شدهاند که باعث شروع ترک و جدایش از مرز بین



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 2/0 میلیمتر) مشاهده می شود در فصل مشترک اتصال ساختار دندریتی تشکیل شده است. این ساختار بیانگر فاز ترد و شکننده TiFe2 می باشد که در حین انجماد سریع تیتانیوم شکل گرفته است. در انحراف پرتوهای 2/4 و 0/6

میلی متر، فصل مشترک اتصال شامل ترکیبات بین فلزی Ti+ Ti₂Cu Ti- Ti₂Cu و TiF میباشد. همان طور که در شکل (7-ج و 7-د) مشاهده می شود یک لایه واکنشی روشن در اطراف آلیاژ تیتانیوم (منطقه Cع) وجود دارد و واکنش یو تکتوئید-α-Ti-Cu تیتانیوم (منطقه Cع) وجود دارد و واکنش یو تکتوئید-α-Ti-Cu تیتانیوم (منطقه Cع) وجود دارد و واکنش یو تکتوئید-۵ -Ti-Ti-Cu مناقله این منطقه از محلول جامد تیتانیوم با مقداری Ti₂Cu در آن تشکیل شده است. محلول جامد تیتانیوم با مقداری Ti₂Cu در آن تشکیل شده است. فازهای به شکل استخوان ماهی که در شکل (7-ج) مشاهده می شود 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 بااین وجود، هنوز ترکها به طور کامل حذف نشده اند اما به مقدار قابل توجهی کاهش یافته اند.

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.

ى.	جدول6- آنالیز نواحی نشان داده شده در شکل7 برحسب درصد وزنی.									
-	انحراف	مناطق	Fe	Ti	Cu	Cr	1 .11			
	پرتو						فازهای			
	(مىلىمتر)						تشكيلشده			
	0	А	55/2	23/2	5/8	13/8	TiFe ₂			
	0/2	В	56/3	19/3	9/1	13/3	TiFe ₂			
	0/4	С	8/4	74/6	13/7	3/3	Ti+ Ti2Cu			
	0/4	D	40/3	34/4	10/8	5/5	TiFe			
	0/6	Е	14/2	67/1	15/3	3/4	Ti+ Ti2Cu			
	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 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 2/0 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 فلزپایه از سمت فلزپایه 17-4PH شروعشده و به سمت فلزپایه ویکرز گزارش شدند. محلهای سختی سنجی به گونهای انتخاب شدهاند که نقاط 1 و 9 در فلزات پایه و نقاط 2،3،7 و در نواحی فصل مشترک حوضچه جوش و فلزپایه و نقاط 5.4

در نمونه جوشکاری شده بدون لایه میانی مس، سختی منطقه جوش در حدود 900 ویکرز میباشد. همان طور که از پروفیل میکروسختی در شکل (9) مشاهده می شود، 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 می شود که به سبب حضور ترکیبات بین فلزی با سختی بالا در این مناطق می باشد.

مر یب ع بین عربی با ساعی با عرارین ساعی می با مدر در نمونه های جوشکاری شده در سرعت 0/7 متر بر دقیقه و انحراف پرتو صفر و 2/0 ترکیب بین فلزی TiFe2 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 می باشد. در شکل(5) این ترک ها به وضوح قابل مشاهده می باشند. در نمونه های جوشکاری شده در سرعت 7/0 متر بر دقیقه و انحراف پرتو 4/4 و 6/6 میلی متر، میزان سختی کاهش یافته است. واضح است که ریز ساختار میزان سختی کاهش یافته است. واضح است که ریز ساختار 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 شکلگیری فازهای موجود میتواند با واکنشهای موضعی زیر توضیح داده شود:

 $\begin{array}{l} L+\alpha\text{-}Ti {\rightarrow} TiFe\text{+}Ti_2Cu~(990^\circ C) \\ L+Ti_2Cu {\rightarrow} TiFe\text{+}CuTi~(950^\circ C) \end{array}$

همان طور که در شکل (8) مشاهده می شود ترکیبات بین فلزی مضر TiFe و Ti₂Cu در میزان انحراف پرتو 6/0 میلی متر ایجاد شده است که با اطلاعات به دست آمده از آنالیز نقطهای مطابقت دارد. شدت پیک پراش نشان می دهد 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 می باشد که به صورت 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 می شود. با توجه به افزایش سرعت جوش و انحرافهای پرتو ایجادشده، اگرچه کاهش ترکها و جدایش در منطقه جوش مشاهده می شود ولی ترکها به طورکلی حذف نشدهاند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که لایه واسط به ضخامت 8/8 میلی متر نتوانسته است در جلوگیری از تشکیل ترکیبات بین فلزی بسیار موثر باشد.

تركيبات بين فلزي حذف نشدهاند و بايد با افزايش 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 می شود 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 می باشد. در انحراف پر تو صفر و 0/2 میلیمتر، سختی در حدود 400 ویکرز مشاهده می شود 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 Ti₂Cu سبب می شود که سختی به شدت كاهش يابد. فاز Ti₂Cu محصول واكنش يوتكتيك - مى باشد و طبق نمودار تعادلى تيتانيوم $L \rightarrow Ti_2Cu + TiCu$ مس، یک ترکیب بین فلزی است ولی این فاز سختی و تردی به مراتب پایین تری از فاز TiFeدارد [7]. در نتیجه انعطاف پذیری اتصال به طور قابل توجهي بهبود مييابد.



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 میلی متر دارای بیشترین استحکام برشی معادل 160 مگاپاسکال بود. شکست در تمامی نمونه ها از فصل مشترک حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم اتفاق افتاد که این مشخص می کند 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 به طور کامل حذف نشده اند.

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 می شود. تأثیر افزایش سرعت و انحراف پرتو به سمت فولاد در کیفیت اتصال نمونههای جوشکاری شده قابل مشاهده می باشد ولی هنوز با جوش ایده آل فاصله وجود دارد. بنابراین در کار آتی، ضخامت لایه واسط افزایش خواهد یافت تا یک اتصال بدون ترکیبات بین فلزی ایجاد شود.

4- نتيجەگىرى

در این پژوهش جوشکاری پرتو الکترونی فولاد زنگنزن رسوب سخت شونده Ti-6Al-4V 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, 2/0, 4/0 و 6/0 میلیمتر) از مرکز لایه میانی به سمت فولاد برای انجام آزمایشهای استفاده شد. 124

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.

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+ ciFe می باشد. این ترکیبات بین فلزی تشکیل شده بسیار ترد و شکننده می باشند و تحمل تنش های 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 می شود ولی منجر به حذف کامل آنها نمی گردد.

- 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 می باشد. بیشترین میزان سختی در سطح مشترک حوضچه جوش و آلیاژ تیتانیوم و همچنین در سطح مشترک حوضچه جوش و فولاد مشاهده می شود که به سبب حضور ترکیبات بین فلزی با سختی بالا در این مناطق می باشد. 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 می باشد.

- 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 TiFe₂ و در سطح مشترک حوضچه جوش و تیتانیوم شامل Ti+Ti₂Cu و TiFe می باشد.

- 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.