

تأثیر لایه میانی مس بر خواص متالورژیکی اتصال نوردی تیتانیم به فولاد

محسن سبکتکین ریزی^{۱*}، سید غلامرضا رضوی^۲، حسین مناجاتی زاده^۳

۱ و ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران

*M_Saboktakin@smt.iaun.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۵/۰۳، تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۰/۰۷)

چکیده

روکش تیتانیم بر روی فولاد منجر به ایجاد خواصی هم چون مقاومت به سایش و خوردگی بالا می شود که باعث کاربرد وسیع این کامپوزیت فلزی در صنایعی از جمله صنایع اتمی، شیمیایی، هوافضا و همچنین مصارف بیومواد گردیده است. یکی از روش های اتصال در حالت جامد جهت اعمال چنین روکشی استفاده از روش اتصال نوردی می باشد. در این مقاله کیفیت روکش نوردی تیتانیم بر روی فولاد ساده کربنی از لحاظ خواص متالورژیکی، مکانیکی و همچنین تأثیر استفاده از لایه میانی مس بر خواص متالورژیکی اتصال مورد بررسی قرار گرفته است. فصل مشترک روکش و پایه با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت و فازهای تشکیل شده توسط آنالیز تفرق اشعه ایکس شناسایی گردید. نتایج نشان می دهد که افزایش دمای اتصال، موجب افزایش ضخامت ترکیبات بین فلزی و افزایش سختی در فواصل نزدیک به فصل مشترک روکش تیتانیمی به فلز پایه می گردد.

واژه های کلیدی:

تیتانیم، اتصال نوردی، روکش، فولاد، خواص مکانیکی، لایه میانی مس

۱- مقدمه

اموال روکش تیتانیم بر روی فولاد باعث ایجاد خواص منحصر به فردی هم چون مقاومت به خوردگی بالا می شود که منجر به کاربرد وسیع این کامپوزیت فلزی در صنایعی از جمله صنایع اتمی، شیمیایی، هوافضا، بیومواد و حتی صنایع هسته ای گردیده است [۱]. اما از آنجایی که تیتانیم حلالیت محدودی در آهن دارد و همچنین یک عنصر کاربیدزای قوی می باشد، لذا استحکام و چسبندگی بالای روکش به زیر لایه حائز اهمیت بوده و باید مورد توجه قرار گیرد [۲]. در اتصال یا روکش مستقیم آلیاژهای تیتانیم به فولاد، برخی از ترکیبات ترد و شکننده و همچنین کاربید تیتانیم (TiC) تشکیل و باعث ترد شدن و کاهش استحکام و چسبندگی محل اتصال خواهند شد. لذا روش های مختلفی دیگری از جمله جوشکاری انفجاری [۳] و اتصال نفوذی [۴]، برای اتصال تیتانیم به فولاد مورد استفاده قرار گرفته است. در جوشکاری با اتصال انفجاری با اینکه استحکام محل اتصال بیشتر از فلزات پایه می باشد ولی اعمال تغییر فرم پلاستیکی شدید جهت اتصال منجر به جدایش و ترک در محل

استحکام و چسبندگی بالای روکش به زیر لایه حائز اهمیت بوده و باید مورد توجه قرار گیرد [۲]. در اتصال یا روکش مستقیم آلیاژهای تیتانیم به فولاد، برخی از ترکیبات ترد و شکننده و همچنین کاربید تیتانیم (TiC) تشکیل و باعث ترد شدن و کاهش استحکام و چسبندگی محل اتصال خواهند شد. لذا روش های مختلفی دیگری از جمله جوشکاری انفجاری [۳] و اتصال نفوذی [۴]، برای اتصال تیتانیم به فولاد مورد استفاده قرار گرفته است. در جوشکاری با اتصال انفجاری با اینکه استحکام محل اتصال بیشتر از فلزات پایه می باشد ولی اعمال تغییر فرم پلاستیکی شدید جهت اتصال منجر به جدایش و ترک در محل

مورد بررسی قرار گرفتند. اندازه دانه‌ها نیز از روی تصاویر میکروسکوپ نوری و مطابق روش خطی اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه Jeffrey محاسبه شد.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده (درصد وزنی)

آلیاژ		
عناصر	تیتانیم	فولاد ساده کربنی
C	۰/۰۲	۰/۱۲
Ti	Bal.	-
Mn	-	۰/۵
H	۰/۰۱	-
O	۰/۲۵	-
N	۰/۰۳	-
Si	-	۰/۵
P	-	۰/۰۳۵
S	-	۰/۰۳۵
Fe	۰/۰۳	Bal.

برای حکاکی فولاد از محلول نایتال ۳٪ و برای حکاکی تیتانیم از محلول کبرول^۶ با ترکیب شیمیایی (92ml H₂O, 2ml HF, 6ml HCl) استفاده گردید. برای تعیین نوع فازهای موجود در زمینه نیز از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) مدل Philip X, Pert استفاده شد. چسبندگی روکش اعمالی به فولاد نیز با استفاده از آزمون پیلینگ^۸ و بر اساس استاندارد ASTM D1876 در دستگاه آزمون کشش مدل Instron 4486 انجام گرفت و جهت اندازه‌گیری سختی روکش، پایه و نقاط نزدیک به آن ریز سختی سنجی و یکرز با نیروی ۳۷/۶۳ گرم در دمای ۲۶/۴°C مورد استفاده قرار گرفت. به منظور سنجش نحوه توزیع سختی در اطراف فصل مشترک، ریز سختی سنجی به فواصل ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومتر از دو طرف فصل مشترک به سمت زیر لایه فولادی و روکش تیتانیمی اندازه‌گیری شد.

اتصال می‌شود. در اتصال نفوذی تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد باعث کاهش استحکام محل اتصال می‌گردد. بنابراین کاهش درصد ترکیبات بین فلزی عامل مهمی در بهبود استحکام اتصال می‌باشد [۴]. در اتصال نوردی^۳ تیتانیم به فولاد از آنجایی که زمان انجام فرآیند بسیار کوتاه می‌باشد زمان کافی برای نفوذ در هم اجزای مورد اتصال وجود نداشته و درصد ترکیبات بین فلزی به آسانی قابل کنترل می‌باشد [۵]. هم‌چنین طبق بررسی‌های انجام شده استفاده از مس به عنوان لایه میانی مانع از تشکیل ترکیبات Fe-Ti و بهبود سطوح مورد اتصال می‌شود [۶]. بر اساس دیاگرام فازی تیتانیم-مس و آهن-مس، هیچ ترکیب بین فلزی بین مس و آهن تشکیل نخواهد شد و هم‌چنین ترکیبات بین فلزی تشکیل شده بین تیتانیم و مس خیلی ترد نیستند [۷]. به دلیل پایین بودن نقطه ذوب مس و پلاستیسیته بالای آن استفاده از مس برای ایجاد تماس بین دو سطح مورد اتصال مناسب است [۸]. در این تحقیق اعمال روکش نوردی تیتانیم خالص تجاری بر روی فولاد ساده کربنی با استفاده از لایه میانی مس از لحاظ خواص مکانیکی، فیزیکی و هم‌چنین تاثیر دمای نورد بر ساختار و استحکام اتصال مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

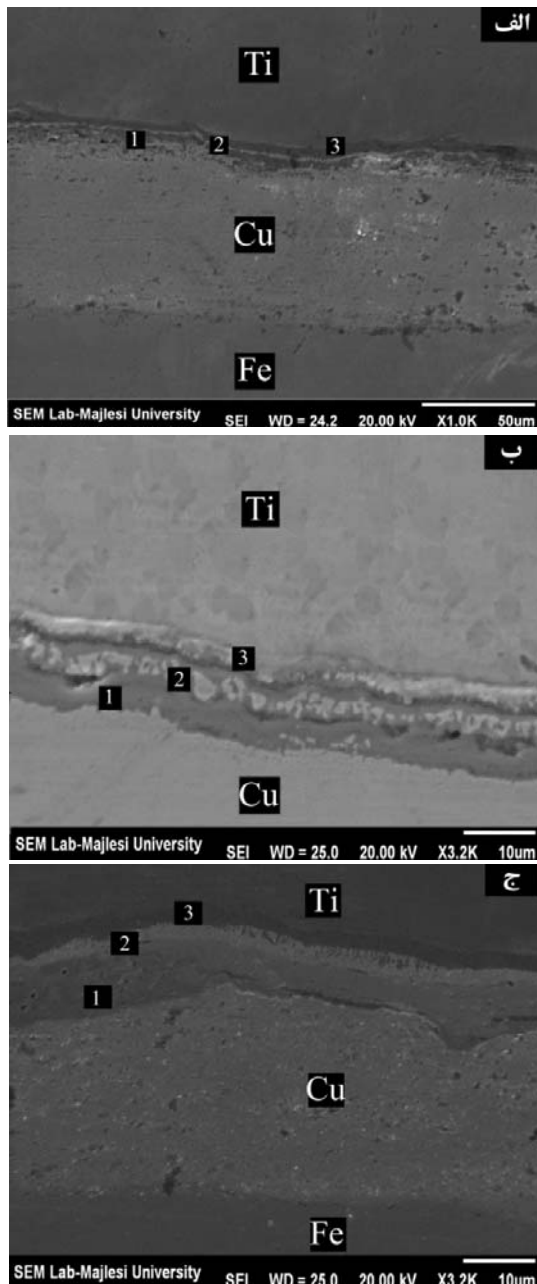
ورق تیتانیم خالص تجاری و فولاد ساده کربنی با ابعاد (mm) ۱۵۰×۱۰۰×۲ با ترکیب شیمیایی موجود در جدول (۱) تهیه شد. هم‌چنین به عنوان لایه میانی از فویل مس خالص تجاری به ضخامت ۱۰۰ میکرومتر استفاده گردید. ورق تیتانیم، مس و فولاد بر روی هم پرچ و نمونه‌های تهیه شده در کوره تحت اتمسفر خنثی در دمای بین ۸۰۰-۹۰۰°C به مدت ۴۰ دقیقه پیش‌گرم و سپس به منظور اعمال کرنش حقیقی ۳۰ درصد عملیات نورد گرم بر روی نمونه‌ها انجام شد و در نهایت نمونه‌ها در کوره تحت اتمسفر خنثی سرد شد. خواص و ریزساختار نمونه‌های حاصل از نورد گرم بوسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM)^۴، مجهز به آنالیز نقطه‌ای (EDX)^۵

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ساختار فصل مشترک اتصال نوردی تیتانیوم به فولاد

نتایج نشان می‌دهد که اعمال روکش تیتانیوم بر روی فولاد توسط فرآیند نورد گرم در دمای بالاتر از 900°C و کم‌تر از 800°C امکان‌پذیر نمی‌باشد. با توجه به اینکه تیتانیوم در دماهای پایین دارای فاز آلفا با ساختار هگزاگونال می‌باشد و دارای سیستم‌های لغزشی محدودی می‌باشد، لذا مقاومت به تغییر فرم پلاستیکی اجزای مورد اتصال زیاد بوده و نیروی اعمالی جهت اتصال، برای تغییر فرم پلاستیکی و شکستن فیلم اکسیدی و دیگر ناخالصی‌ها در فصل مشترک اتصال کافی نبوده و لذا روکش تیتانیوم و فولاد در دمایی کمتر از 800°C امکان‌پذیر نمی‌باشد [۹-۱۰]. از طرف دیگر در دماهای بالاتر از 900°C تیتانیوم و مس تشکیل یک نقطه ذوب یوتکتیک می‌دهند و درصد ترکیبات بین فلزی در طول فصل مشترک تیتانیوم-مس به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و موجب ترک و جدایش در فصل مشترک روکش و فلز پایه می‌گردد، لذا روکش تیتانیوم و فولاد در دماهایی بالاتر از 900°C امکان‌پذیر نخواهد بود [۱۱]. شکل (۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک روکش تیتانیوم به فولاد در دماهای مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود هیچ لایه نفوذی یا واکنشی در فصل مشترک مس و فولاد رخ نداده است که آن را می‌توان به حلالیت محدود مس در فولاد و کوتاه بودن زمان فرآیند اتصال‌دهی نسبت داد [۵-۶]. اما در فصل مشترک اتصال تیتانیوم-مس مشاهده می‌شود که سه لایه واکنشی حاصل از فرآیند نفوذ مس در شبکه تیتانیوم در فصل مشترک اتصال تشکیل گردیده است که در دماهای مختلف اتصال، دارای ضخامت‌های متفاوتی می‌باشند. افزایش ضخامت لایه‌ها با افزایش دما، به دلیل ساختار متفاوت تیتانیوم در بالا و پایین دمای 882°C می‌باشد به گونه‌ای که تیتانیوم در زیر دمای فوق دارای ساختار ساختار آلفا با شبکه هگزاگونال و بالای این دما دارای ساختار بتا با شبکه مکعبی مرکزدار می‌باشد و با توجه به اینکه

مس دارای شبکه متراکم FCC می‌باشد لذا این امر منجر گردیده که نفوذ اتم‌های مس در شبکه غیر متراکم تیتانیوم راحت‌تر صورت پذیرفته و با افزایش دمای فرآیند، اتم‌های مس مسافت‌های بیشتری را در شبکه تیتانیوم نفوذ کنند [۱۱].



شکل (۱): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از فصل مشترک اتصال نوردی تیتانیوم به فولاد در دماهای: الف) 800°C ب) 850°C و ج) 900°C

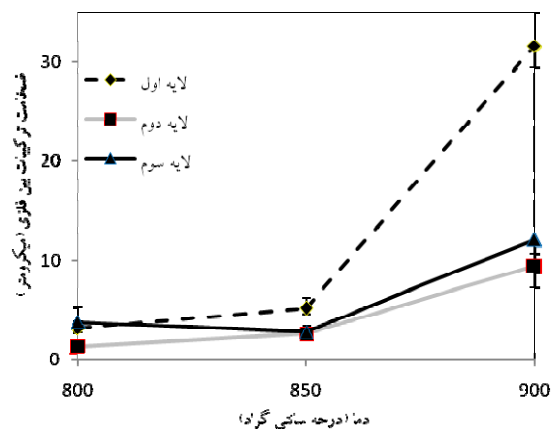
حسب (K)، K_0 : ثابت رشد بر حسب (m^2s^{-1}) ، Q: انرژی فعال سازی برای رشد لایه ها $(KJmol^{-1})$ ، R: ثابت گازها $(8.314 Jmol^{-1}k^{-1})$ می باشد [۶-۹].

جدول (۲): فازهای تشخیص داده شده در فصل مشترک تیتانیم- مس با توجه به نتایج حاصل از آنالیز عنصری EDX و تطبیق آن با دیاگرام فازی

تیتانیم- مس		
دما (°C)	لایه	فازهای تشکیل شده
۸۰۰	۱	$Ti_2Cu_3 + \beta TiCu_4$
	۲	$TiCu + Ti_3Cu_4$
	۳	$Ti_2Cu + Ti$
۸۵۰	۱	$Cu + \beta TiCu_4$
	۲	Ti_2Cu
	۳	$TiCu + Ti_3Cu_4$
۹۰۰	۱	$Ti_2Cu_3 + Ti_3Cu_4$
	۲	$Ti_2Cu + TiCu$
	۳	$Ti_2Cu + Ti$

جهت بررسی نحوه توزیع عناصر مختلف به خصوص آهن، تیتانیم و مس در فصل مشترک اتصال، آنالیز خطی تهیه گردید. شکل (۳) تصویر حاصل از آنالیز خطی فصل مشترک تیتانیم- فولاد در دمای $900^{\circ}C$ را نشان می دهد. بر اساس آنالیز خطی فوق ملاحظه می گردد که عنصر مس نفوذ چندانی در شبکه فولاد نداشته است که دلیل آن کم بودن حلالیت و ضریب نفوذ مس در آهن می باشد $(D_{\alpha Fe}^{Cu} = 4.42 \times 10^{-9} cm^2/s)$ ولی عنصر مس به طور قابل ملاحظه ای در شبکه تیتانیم نفوذ کرده است به طوری که حضور عنصر مس در فواصل دور از فصل مشترک قابل مشاهده است. مهاجرت اتم های مس در فواصل دور از شبکه تیتانیم در دمای $900^{\circ}C$ به دلیل افزایش ضریب نفوذ مس در شبکه تیتانیم بتا با افزایش دما می باشد $[4](D_{\beta Ti}^{Cu} = 11.3 \times 10^{-3} cm^2/s)$

شکل (۲) نمودار افزایش ضخامت لایه های نفوذی در فصل مشترک اتصال تیتانیم- مس با دما را نشان می دهد، که افزایش ضخامت ترکیبات با افزایش دما به خوبی قابل ملاحظه می باشد.



شکل (۲): ضخامت ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک تیتانیم- مس بر حسب دما

جهت پی بردن به ماهیت این لایه ها آنالیز EDX انجام شد. ترکیب شیمیایی بدست آمده از آنالیز عنصری فوق با دیاگرام فازی تیتانیم- مس تطبیق و فازهای تشکیل شده در این لایه ها تخمین زده شد که نتایج حاصل در جدول (۲) گزارش شده است. همان گونه که مشاهده می گردد لایه های تشکیل شده حاوی ترکیبات Ti_2Cu ، $TiCu$ ، Ti_3Cu_4 ، Ti_2Cu_3 ، $TiCu_4$ می باشند که مطابق شکل (۲) با افزایش دما، ضخامت این لایه ها نیز افزایش یافته است. نتایج نشان می دهد که رشد لایه های نفوذی مجزا به صورت سهمی می باشد و با فرض دیفوزیون کنترل بودن واکنش از روابط زیر بدست می آید:

$$X^2 = kt \quad (1)$$

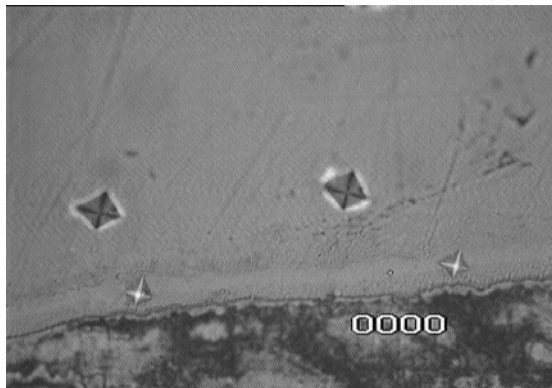
$$K = k_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2)$$

که در روابط فوق X: ضخامت لایه های نفوذی بر حسب (m)، t: زمان اتصال دهی بر حسب (S)، T: دمای اتصال بر

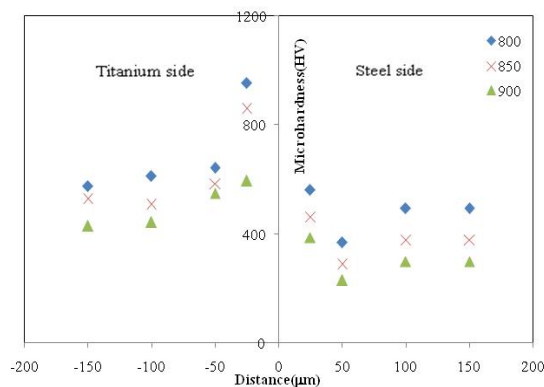
از آنجایی که مس یک عنصر پایدار کننده فاز بتا می باشد لذا وجود لایه میانی مس در فصل مشترک اتصال موجب پایدار شدن فاز β گشته و مهاجرت اتم های مس در شبکه تیتانیوم باعث کاهش دمای استحاله یوتکتوئید $\beta \xrightarrow{882^\circ C} \alpha + \beta$ می شود و ساختار سوزنی شکل $\alpha + \beta$ از تجزیه فاز β در طول سرد کردن نمونه ها حاصل می گردد [۴-۸].

۳-۲- نتایج حاصل از ریز سختی سنجی فصل مشترک اتصال نوردی تیتانیوم به فولاد

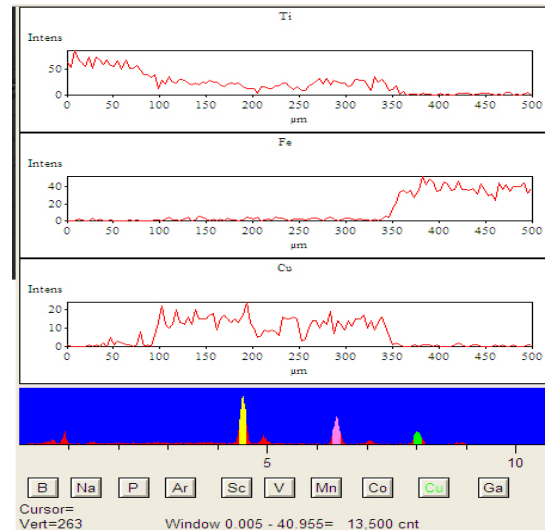
شکل (۵) تصویر میکروسکوپ نوری از ریز سختی سنجی فصل مشترک اتصال نوردی و شکل (۶) نتایج حاصل از ریز سختی سنجی ویکرز نمونه ها در دماهای مختلف مورد آزمایش را نشان می دهد.



شکل (۵): تصویر میکروسکوپ نوری از ریز سختی سنجی نمونه های مورد اتصال

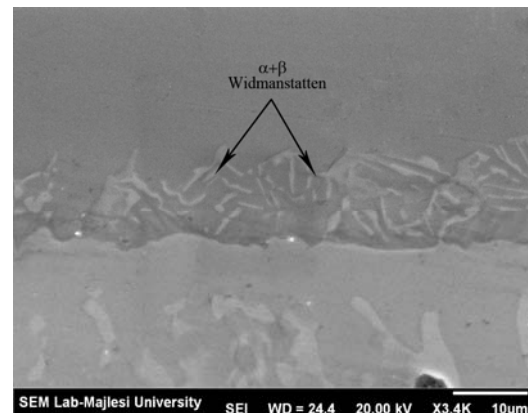


شکل (۶): نتایج حاصل از ریز سختی سنجی فواصل دور و نزدیک به فصل مشترک



شکل (۳): نتایج حاصل از آنالیز خطی از توزیع عناصر مختلف در فصل مشترک تیتانیوم- فولاد در دمای $900^\circ C$

در بررسی فصل مشترک اتصال نوردی تیتانیوم به فولاد که در شکل (۴) نشان داده شده است یک ساختار سوزنی شکل مشاهده می گردد.



شکل (۴): ساختار سوزنی شکل $\alpha + \beta$ در فصل مشترک اتصال تیتانیوم- مس در دمای $900^\circ C$

با بررسی بیشتر ساختار موجود در شکل فوق مشخص گردید که ساختار حاصله ساختار سوزنی شکل $\alpha + \beta$ است. ایجاد چنین ساختاری در فصل مشترک تیتانیوم- مس به این علت می باشد که

الگوی پراش حاصله از سطح شکست نشان می‌دهد که فازهای تشکیل شده در فصل مشترک اغلب فازهای Ti_2Cu_3 ، Ti_2Cu_4 ، Ti_3Cu_4 ، $TiCu$ ، Ti_2Cu بوده و هیچ فازی از ترکیبات Fe-Ti و کاربید تیتانیم (TiC) در سطوح اتصال مشاهده نگردید. هم‌چنین حضور عنصر مس در سطح شکست اتصال در دمای $900^{\circ}C$ – $800^{\circ}C$ نشان دهنده این است که شکست در ناحیه بین مس و ترکیبات بین فلزی رخ داده است که خود بیانگر چسبندگی مناسب بین تیتانیم-مس و مس- فولاد می‌باشد.

۴- نتیجه گیری:

- ۱- فصل مشترک فولاد-مس عاری از هرگونه لایه‌های واکنشی حاصل از فرآیند نفوذ می‌باشد.
- ۲- در فصل مشترک مس-تیتانیم به دلیل نفوذ مس در شبکه تیتانیم، سه لایه نفوذی حاصل می‌گردد.
- ۳- مس به عنوان یک لایه میانی پایدار کننده فاز β بوده که ضمن تشکیل ساختار سوزنی شکل $\alpha+\beta$ به عنوان یک مانع نفوذی عمل کرده و مانع از نفوذ تیتانیم و آهن در یکدیگر و تشکیل ترکیبات بین فلزی Fe-Ti و TiC می‌شود.
- ۴- تشکیل ترکیبات بین فلزی Ti-Cu موجب افزایش سختی در فواصل نزدیک به فصل مشترک تیتانیم-مس می‌گردد.

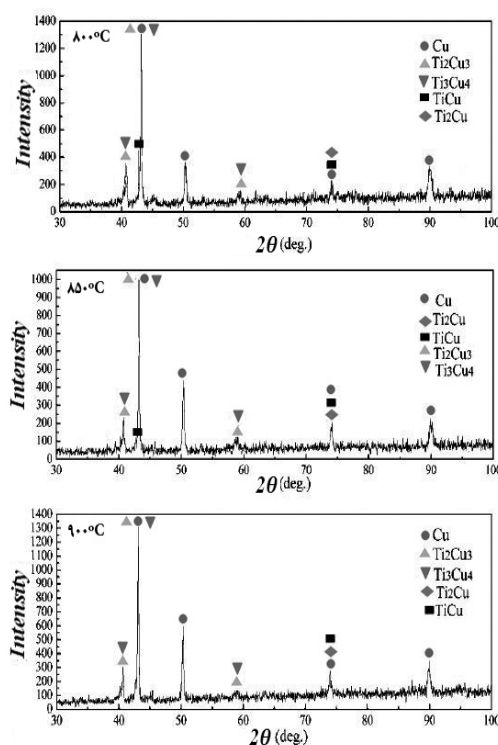
۵- مراجع

- [1] S. N. Polyanskii and V.S. Kolnagorov, "Cladded steel for the Oil and Gas Industries", Chemical and petroleum Engineering, Vol. 38, pp. 11–12, 2002.
- [2] G. E. Totten, Steel Heat treatment Handbook 2nd ed, p. 17-18, Taylor & Francis, 2006.
- [3] N. Kahramana and B.Gulenc, "Joining of Titanium/Stainless Steel By Explosive Welding And Effect on Interface", Materials Processing Technology, Vol. 169, pp. 127–133, 2005.
- [4] A. Elrefaey and W. Tillmann, "Solid State Diffusion Bonding Of Titanium to Steel Using A Copper Base Alloy as Interlayer", Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 2746–2752. 2009.
- [5] T. Fukuda and Y. Seino, "Bonding Strength and Microstructure of Bonding Interface of Hot Rolled Titanium Clad Steel", Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 75, pp. 94-101, 1989.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد در نواحی نزدیک به فصل مشترک تیتانیم با مس، سختی بالا است و با افزایش فاصله از فصل مشترک مقدار سختی کاهش یافته است ولی در فصل مشترک فولاد با مس تغییر چندانی در مقدار سختی مشاهده نمی‌شود. افزایش مقدار سختی در فصل مشترک مس-تیتانیم به دلیل تشکیل فازهای بین فلزی متشکل از ترکیبات Ti-Cu می‌باشد که این ترکیبات دارای سختی بالاتری نسبت به فلزات پایه می‌باشند [۱۰] و چون بر اساس شکل (۲) با افزایش دما در فواصل نزدیک به فصل مشترک تیتانیم و مس افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌گردد میزان درخشندگی نقطه اثر در فصل مشترک اتصال بیشتر از بقیه نواحی است که این بیانگر سختی بیشتر نواحی نزدیک به فصل مشترک می‌باشد.

۳-۳- بررسی نتایج حاصل از آنالیز XRD

نتایج حاصل از آنالیز XRD از سطح شکست روکش تیتانیم به فولاد در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷): نتایج حاصل از آنالیز تفرق اشعه ایکس

۶- پی نوشت

- 1- Explosive welding
- 2- Diffusion bonding
- 3- Roll bonding
- 4- Scanning Electron Microscope
- 5- Energy Dispersive X-ray fluorescence
- 6- Kroll's Solution
- 7- X-ray Diffraction
- 8- Peeling Test

- [6] S. Kundu and S. Chatterjee, "Characterization of Diffusion Bonded Joint Between Titanium and 304 Stainless Steel Using a Ni Interlayer", *Materials Characterization*, Vol. 59, pp. 631-637, 2008.
- [7] M. K. Lee and J. G. Lee, "Interlayer Engineering for Dissimilar Bonding of Titanium to Stainless Steel", *Materials letters*, Vol. 64, Issue. 9, pp. 1105-1108, 2010.
- [8] A. Elrefaey and W. Tillmann, "Evaluation of Transient Liquid Phase Bonding Between Titanium and Steel", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 11, No. 7, pp. 556-560, 2009.
- [9] S. Dziallach and W. Bleck, "Roll-Bonded Titanium/Stainless-Steel Couples, Part1 Diffusion and Interface-Layer Investigation", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 11, No. 1-2, pp. 82-87, 2009.
- [10] R Ferro and A. Saccoe, *Intermetallic Chemistry*, Elsevier, London, 2008.
- [11] C. Leyens and M. Peters, *Titanium and Titanium Alloy*, Wiley-VCH, Germany, 2003.