

اتصال نوردی تیتانیوم به فولاد با استفاده از لایه میانی نیکل

محسن سبکتکین ریزی^{1*}، سید غلامرضا رضوی² و حسین مناجاتی زاده²

چکیده

روکش تیتانیوم روی فولاد منجر به ایجاد خواصی همچون مقاومت به خوردگی بالا می‌شود که باعث کاربرد وسیع این کامپوزیت فلزی در صنایعی از جمله صنایع اتمی، شیمیایی، هوافضا و هم‌چنین، مصارف بیومواد شده است. یکی از روش‌های اتصال در حالت جامد جهت اعمال چنین روکشی استفاده از روش اتصال نوردی می‌باشد. در این مقاله کیفیت روکش نوردی تیتانیوم روی فولاد ساده کربنی از لحاظ خواص متالورژیکی، مکانیکی و هم‌چنین، تاثیر استفاده از لایه میانی نیکل به عنوان مانع نفوذی 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 به وسیله آنالیز تفرق اشعه ایکس شناسایی گردید. نتایج نشان می‌دهد که هیچ‌گونه لایه واکنشی در فصل مشترک فولاد با نیکل تشکیل نخواهد شد، اما در فصل مشترک تیتانیوم با نیکل چندین لایه نفوذی شامل $TiNi_3$, $TiNi$, Ti_2Ni مشاهده می‌شود که افزایش دمای اتصال موجب افزایش ضخامت ترکیبات بین فلزی و افزایش سختی در فواصل نزدیک به فصل مشترک روکش تیتانیومی به فلز پایه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تیتانیوم، اتصال نوردی، روکش، فولاد، خواص مکانیکی، لایه میانی نیکل.

1- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران.

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

*- نویسنده مسئول مقاله: Mohsen.saboktakin@gmail.com

پیشگفتار

اعمال روکش تیتانیوم روی فولاد باعث ایجاد خواص منحصر به فردی همچون مقاومت به خوردگی بالا می‌شود که منجر به کاربرد وسیع این کامپوزیت فلزی در صنایعی از جمله صنایع اتمی، شیمیایی، هوا فضا، بیومواد و حتی صنایع هسته‌ای گردیده است [1]، اما از آنجایی که تیتانیوم حلالیت محدودی در آهن دارد (کمتر از 0/1 درصد) و همچنین، یک عنصر کاربیدزای قوی می‌باشد، لذا استحکام و چسبندگی بالای روکش به زیر لایه دارای اهمیت بوده و باید مورد توجه قرار گیرد [2].

در اتصال یا روکش مستقیم آلیاژهای تیتانیوم به فولاد، برخی از ترکیبات ترد و شکننده و همچنین، کاربید تیتانیوم (TiC) تشکیل و باعث ترد شدن و کاهش استحکام و چسبندگی محل اتصال خواهند شد. لذا، روش‌های جوشکاری در در حالت جامد [3] از جمله جوشکاری انفجاری¹ [4] و اتصال نفوذی² [5]، برای اتصال تیتانیوم به فولاد مورد استفاده قرار گرفته است.

در جوشکاری یا اتصال انفجاری با اینکه استحکام محل اتصال بیش‌تر از فلزات پایه می‌باشد، ولی اعمال تغییر شکل پلاستیکی شدید جهت اتصال منجر به جدایش و ترک در محل 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 [5].

در اتصال نوردی³ تیتانیوم به فولاد از آنجایی که زمان انجام فرایند بسیار کوتاه می‌باشد، زمان کافی برای نفوذ درهم اجزای مورد اتصال جود نداشته و درصد ترکیبات بین فلزی به آسانی قابل کنترل می‌باشد [6]. همچنین، بر اساس بررسی‌های انجام شده استفاده از نیکل به عنوان لایه میانی مانع از تشکیل ترکیبات Fe-Ti و بهبود سطوح مورد اتصال می‌شود [7 و 6]. بر اساس دیاگرام فازی تیتانیوم- نیکل و آهن- نیکل، هیچ ترکیب بین فلزی بین نیکل و آهن تشکیل نخواهد شد و همچنین، ترکیبات بین فلزی تشکیل شده بین تیتانیوم و نیکل خیلی ترد نیستند [8]. به دلیل دارا بودن خواص مقاومت به خوردگی بالای

نیکل و پلاستیسیته نسبتاً خوب آن استفاده از نیکل برای ایجاد تماس بین دو سطح مورد اتصال مناسب است [9]. در این پژوهش اعمال روکش نوردی تیتانیوم خالص تجاری بر روی فولاد ساده کربنی با استفاده از لایه میانی نیکل از لحاظ خواص مکانیکی، فیزیکی و همچنین، تاثیر دمای نورد بر ساختار و استحکام اتصال مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش پژوهش

ورق تیتانیوم خالص تجاری و فولاد ساده کربنی با ابعاد (mm) $150 \times 100 \times 2$ با ترکیب شیمیایی موجود در جدول 1 تهیه شد. همچنین از فویل نیکل با خلوص 99٪ به عنوان لایه میانی استفاده گردید.

پس از اعمال لایه میانی نیکل روی سطوح مورد اتصال، ورق تیتانیوم و فولاد بر روی هم پرچ و نمونه‌های تهیه شده در کوره زیر اتمسفر خنثی در دمای بین $750-950^{\circ}\text{C}$ به مدت 40 دقیقه پیش‌گرم و سپس بمنظور اعمال کاهش ضخامت 30 درصد عملیات نوردگرم بر روی نمونه‌ها انجام شد و در نهایت، نمونه‌ها در کوره تحت اتمسفر خنثی سرد شدند.

خواص و ریزساختار نمونه‌های ناشی از نورد گرم به وسیله میکروسکپ نوری و الکترونی روبشی⁴ (SEM)، مجهز به آنالیز نقطه‌ای⁵ (EDX) مورد بررسی قرار گرفتند.

برای حکاکی فولاد از محلول نایتال 3٪ و برای حکاکی تیتانیوم از محلول کروم⁶ با ترکیب شیمیایی (92ml H₂O, 2ml HF, 6ml HCl) استفاده شد.

تعیین نوع فازهای موجود در زمینه نیز به کمک دستگاه پراش اشعه ایکس⁷ (XRD) مدل Philips X'Pert انجام شد. جهت اندازه‌گیری سختی روکش، پایه و نقاط نزدیک به آن ریز سختی سنجی ویکرز با نیروی 25 گرم در دمای محیط مورد استفاده قرار گرفت. بمنظور سنجش چگونگی توزیع سختی در اطراف فصل مشترک، ریزسختی سنجی به فواصل 25، 50، 100 و 200 میکرومتر از دو

⁴ - Scanning Electron Microscope

⁵ - Energy Dispersive X-ray fluorescence

⁶ - Kroll's Solution

⁷ - X-ray Diffraction

¹ - Explosive welding

² - Diffusion bonding

³ - Roll bonding

نیکل و فلز تیتانیومی مشاهده شد که افزایش دمای اتصال تا 900°C باعث ایجاد یک منطقه نفوذی عمیق در فصل مشترک تیتانیوم - نیکل و افزایش ضخامت ترکیبات بین‌فلزی شده است. 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 ذکر شده دارای ساختار آلفا با شبکه هگزگونال و بالای این دما دارای ساختار بتا با شبکه Bcc می‌باشد و با توجه به این که نیکل دارای شبکه متراکم Fcc می‌باشد، نفوذ اتم‌های نیکل در شبکه نامتراکم تیتانیوم راحت‌تر صورت گرفته و با افزایش دمای فرایند، اتم‌های نیکل مسافت‌های بیش‌تری در شبکه تیتانیوم نفوذ می‌کنند [12].

جهت آگاهی از ماهیت این لایه‌ها، آنالیز EDX انجام گرفت. ترکیب شیمیایی بدست آمده از آنالیز عنصری بالا با دیاگرام فازی تیتانیوم - نیکل تطبیق و فازهای تشکیل شده در این لایه‌ها تخمین زده شد و ضخامت هر یک از این لایه‌ها به صورت مجزا در هر دما محاسبه گردید که نتایج بدست آمده در جدول 2 گزارش شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، لایه‌های تشکیل شده حاوی ترکیبات TiNi ، Ti_2Ni ، TiNi_3 می‌باشند که با تصاویر نشان داده شده در شکل 3، با افزایش دما ضخامت این لایه‌ها نیز افزایش یافته است. بررسی پژوهشگران نشان می‌دهد که رشد لایه‌های نفوذی مجزا به صورت سهمی می‌باشد و با فرض دیفیوژیون کنترل بودن واکنش از روابط زیر بدست می‌آید [7 و 10]:

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

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

که در روابط بالا X ، ضخامت لایه‌های نفوذی بر حسب (m)، t ، زمان اتصال دهی بر حسب (S)، T ، دمای اتصال بر حسب (K)، K_0 ، ثابت رشد بر حسب $(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ ، Q ، انرژی فعال‌سازی برای رشد لایه‌ها (kJmol^{-1}) ، R ، ثابت گازها $(8.314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1})$ می‌باشد.

جهت بررسی چگونگی توزیع عناصر گوناگون بویژه آهن، تیتانیوم و نیکل در فصل مشترک اتصال، آنالیز خطی انجام گرفت که در شکل 5 تصویر حاصل از این آنالیز خطی در فصل مشترک تیتانیوم - فولاد در دمای 900°C

طرف فصل مشترک به سمت زیر لایه فولادی و روکش تیتانیومی اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

بررسی ساختار فصل مشترک اتصال نوردی تیتانیوم به فولاد

بررسی‌ها نشان می‌دهند که اعمال روکش تیتانیوم بر روی فولاد به‌وسیله فرایند نورد گرم در دمای بالاتر از 900°C و کم‌تر از 800°C امکان پذیر نمی‌باشد. با توجه به این که تیتانیوم در دماهای پایین دارای فاز آلفا با ساختار هگزگونال است و دارای سیستم‌های لغزشی محدودی می‌باشد، لذا، مقاومت به تغییر شکل پلاستیکی اجزای مورد اتصال زیاد بوده و نیروی اعمالی جهت اتصال، برای تغییر شکل 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 امکان پذیر نمی‌باشد [10 و 11]. از سوی دیگر، در دماهای بالاتر از 900°C تیتانیوم و نیکل تشکیل یک نقطه ذوب یوتکتیک می‌دهند و درصد ترکیبات بین‌فلزی در طول فصل مشترک تیتانیوم - نیکل به گونه‌ای قابل ملاحظه افزایش یافته و بر اساس شکل 1 موجب ترک و جدایش در فصل مشترک روکش و فلز پایه می‌گردد؛ لذا روکش تیتانیوم و فولاد در دماهایی بالاتر از 900°C امکان پذیر نخواهد بود [12].

شکل 2 تصویر میکروسکوپی نوری از اتصال نوردی تیتانیوم به فولاد در دمای 900°C مورد آزمایش را نشان می‌دهد. بر اساس تصاویر میکروسکوپی نوری مشاهده شد که فصل مشترک اتصال کاملاً مسطح بوده و هیچ‌گونه ترک یا ناپیوستگی در فصل مشترک اتصال مشاهده نشد. در شکل 3 نیز تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از فصل مشترک نیکل - فولاد در دمای 900°C را نشان می‌دهد همان‌گونه که مشاهده می‌گردد هیچ‌گونه لایه نفوذی در فصل مشترک اتصال تشکیل نگردیده است که آن را می‌توان به حلالیت محدود نیکل در فولاد و کوتاه بودن زمان فرایند اتصال دهی نسبت داد [6 و 7]. در فصل مشترک تیتانیوم - نیکل نشان داده شده در شکل 4 چندین لایه واکنشی حاصل از فرایند نفوذ بین لایه میانی

فلزات پایه می‌باشند [11] و چون بر اساس شکل 3 با افزایش دما میزان این ترکیبات افزایش یافته لذا، مقدار سختی نیز با افزایش دما در فواصل نزدیک به فصل مشترک تیتانیوم و نیکل افزایش می‌یابد. همان گونه که در شکل 7 مشاهده می‌شود، میزان درخشندگی نقطه اثر در فصل مشترک اتصال بیش‌تر از دیگر نواحی است که این بیانگر سختی بیش‌تر نواحی نزدیک به فصل مشترک می‌باشد.

بررسی نتایج ناشی از آنالیز XRD

نتایج ناشی از آنالیز XRD از سطح شکست روکش تیتانیوم به فولاد در شکل 9 نشان داده شده است. الگوی پراش ایجاد شده از سطح شکست نشان می‌دهد که فازهای تشکیل شده در فصل مشترک بیش‌تر فازهای $TiNi$ ، Ti_2Ni ، $TiNi_3$ ، بوده و هیچ فاز از ترکیبات Fe-Ti و کاربید تیتانیوم (TiC) در سطوح اتصال مشاهده نگردید. همچنین، حضور عنصر نیکل در سطح شکست اتصال در دمای $800-900^{\circ}C$ نشان دهنده این است که شکست در ناحیه بین نیکل و ترکیبات بین فلزی رخ داده است که خود بیانگر چسبندگی مناسب بین تیتانیوم- نیکل و نیکل- فولاد می‌باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر لایه میانی نیکل بر اتصال نوردی تیتانیوم بر یک نوع فولاد مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

- 1- فصل مشترک فولاد- نیکل عاری از هرگونه لایه‌های واکنشی ناشی از فرایند نفوذ می‌باشد.
- 2- در فصل مشترک نیکل- تیتانیوم به دلیل نفوذ نیکل در شبکه تیتانیوم سه لایه نفوذی ایجاد می‌شود.
- 3- نیکل 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 تیتانیوم و آهن در یک‌دیگر و تشکل ترکیبات بین فلزی Fe-Ti و TiC می‌شود.

نشان داده شده است. بر اساس آنالیز خطی، ملاحظه می‌شود که عنصر نیکل نفوذ چندانی در شبکه فولاد نداشته است که دلیل آن را می‌توان بر کم‌بودن حلالیت و ضریب نفوذ نیکل در آهن دانست، ولی عنصر نیکل به گونه قابل ملاحظه‌ای در شبکه تیتانیوم نفوذ کرده است به گونه‌ای که حضور عنصر نیکل در فواصل دور از فصل مشترک قابل مشاهده است. مهاجرت اتم‌های نیکل در فواصل دور از شبکه تیتانیوم در دمای $900^{\circ}C$ به دلیل افزایش ضریب نفوذ نیکل در شبکه تیتانیوم بتا با افزایش دما می‌باشد [5].

فصل مشترک اتصال تیتانیوم و نیکل در شکل 6 نشان داده شده است که بررسی‌ها حاکی از تشکیل یک ساختار سوزنی شکل در این فصل مشترک می‌باشد. با بررسی بیش‌تر ساختار موجود (ساختار سوزنی شکل)، در شکل بالا مشخص شد که ساختار بدست آمده ساختار سوزنی شکل $\alpha+\beta$ است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که ایجاد چنین ساختاری در فصل مشترک تیتانیوم- نیکل به این علت است که نیکل یک عنصر پایدارکننده فاز بتا می‌باشد در نتیجه، وجود لایه میانی نیکل در فصل مشترک اتصال موجب پایدار شدن فاز β شده و مهاجرت اتم‌های نیکل در شبکه تیتانیوم باعث کاهش دمای استحاله یوتکتوئید می‌شود و ساختار سوزنی شکل $\alpha+\beta$ از تجزیه فاز β در طول سرد کردن نمونه‌ها حاصل می‌گردد [9 و 5].

نتایج ناشی از ریزسختی سنجی فصل مشترک اتصال نوردی تیتانیوم به فولاد

شکل 7 تصویر میکروسکوپی نوری از ریز سختی سنجی فصل مشترک اتصال نوردی و شکل 8 نتایج ناشی از ریز سختی سنجی نمونه‌ها در دماهای گوناگون مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، در نواحی نزدیک به فصل مشترک تیتانیوم - نیکل سختی بالاست و با افزایش فاصله از فصل مشترک مقدار سختی کاهش یافته است، ولی در فصل مشترک فولاد - نیکل تغییر چندانی در مقدار سختی مشاهده نمی‌شود. افزایش مقدار سختی در فصل مشترک نیکل- تیتانیوم به دلیل تشکیل فازهای بین فلزی متشکل از ترکیبات Ti-Ni می‌باشد که این ترکیبات دارای سختی بالاتری نسبت به

می‌شود.

4- تشکیل ترکیبات بین فلزی Ti-Ni موجب افزایش سختی در فواصل نزدیک به فصل مشترک تیتانیوم- نیکل

References

1- S. N. Polyanskii and V.S. Kolnogorov, "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 2rd ed, p. 17-18, Taylor & Francis, 2006.

3- ا. زنده باد و ح. دانش منش، "بررسی رفتار فشاری فوم‌های آلومینیمی تولید شده با استفاده از فرآیند اتصال نوردی تجمعی (ARB)", مجله مواد نوین، جلد 1، شماره 4، ص 1-13، تابستان 1390.

4- N. Kahramana, and B.Gulenc, "Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface", Journal of Materials Processing and Technology, Vol. 169, pp. 127-133, 2005.

5- A. Elrefaey, and W. Tillmann, "Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer", Journal of Materials Processing and Technology, Vol. 209, pp. 2746-2752. 2009.

6- 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.

7- 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.

8- 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.

9- 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.

10- 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.

11- R. Ferro, and A. Saccoe, Intermetallic Chemistry, Elsevier, London, 2008.

12- C. Leyens and M. Peters, Titanium and Titanium Alloy, Wiley-VCH, Germany, 2003.

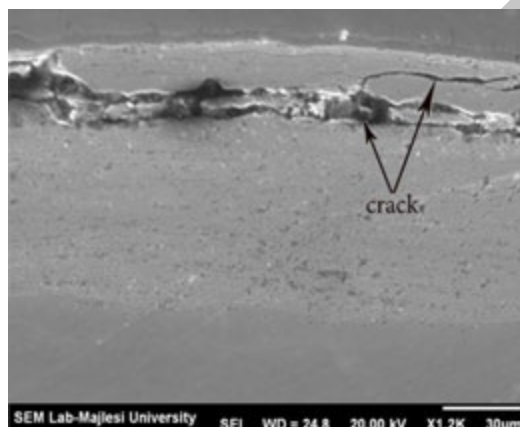
پیوست‌ها

جدول 7- ترکیب شیمیایی فلزات مورد اتصال.

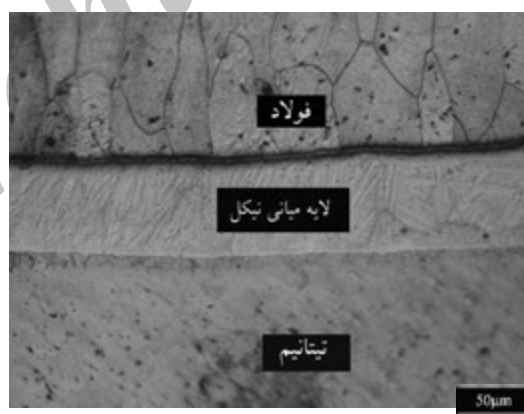
آلیاژ	C	Ti	Mn	H	O	N	Si	P	S	Fe
تیتانیوم خالص	0.02	Bal.	-	0.01	0.25	0.03	-	-	-	0.03
فولاد ساده کربنی	0.12	-	0.50	-	-	-	0.50	0.035	0.035	Bal.

جدول 2- فازهای تشخیص داده شده در فصل مشترک تیتانیوم-نیکل با توجه به نتایج حاصل از آنالیز عنصری EDX و تطبیق آن با دیاگرام فازی تیتانیوم-نیکل.

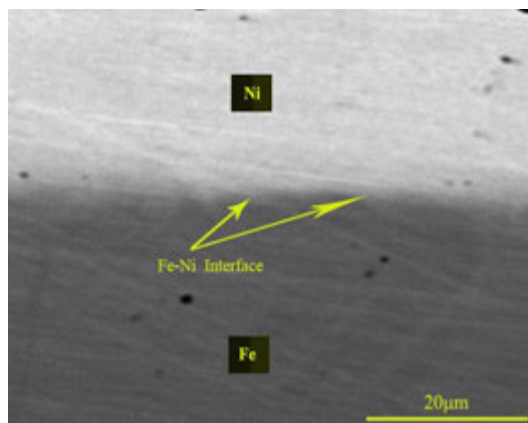
دما (°C)	لایه	فازهای تشکیل شده
800	1	Ti ₂ Ni
	2	TiNi
	3	TiNi ₃
850	1	Ti ₂ Ni
	2	TiNi
	3	Ni+TiNi ₃
900	1	Ni+Ti ₂ Ni
	2	TiNi
	3	TiNi ₃



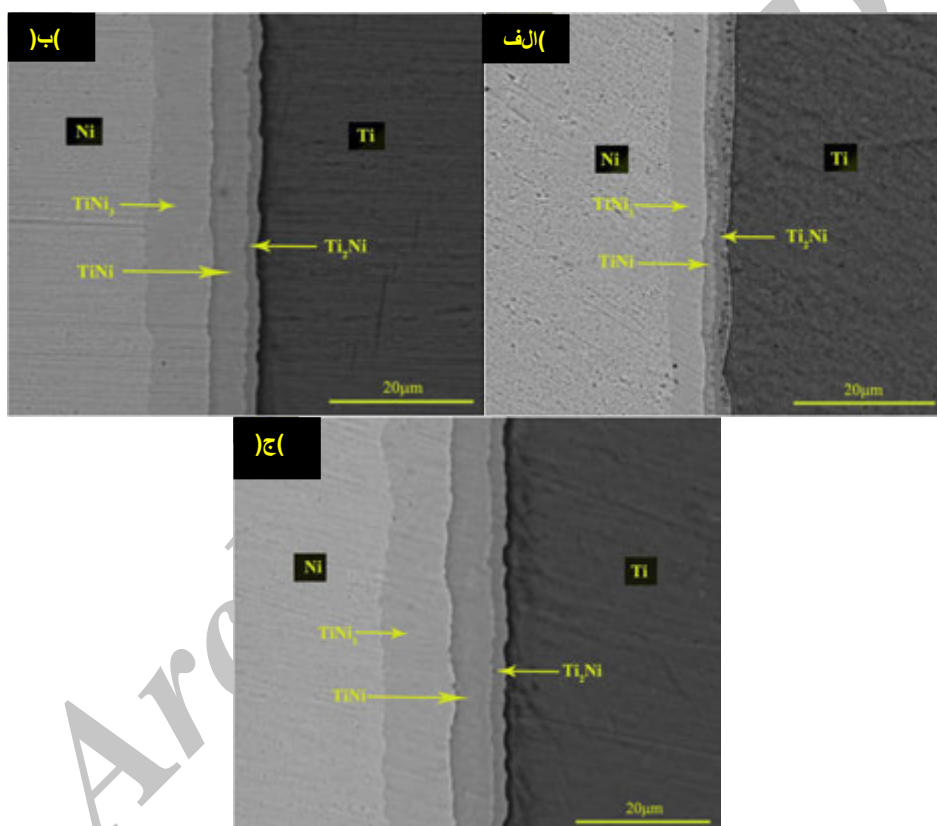
شکل 7- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از میکروتترک‌های ناشی از اتصال نوردی تیتانیوم به فولاد در دمای 605°C.



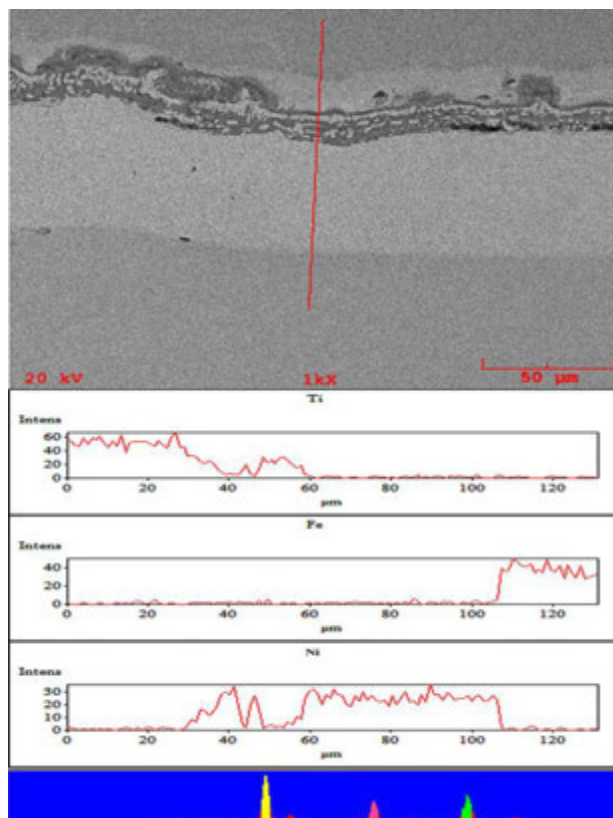
شکل 2- تصویر میکروسکپ نوری از فصل مشترک اتصال در دمای 655°C.



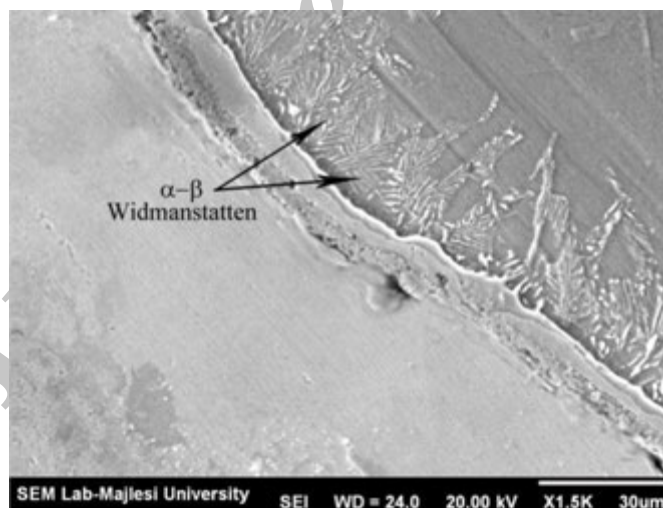
شکل 7 - فصل مشترک اتصال فولاد- نیکل در دمای 655°C .



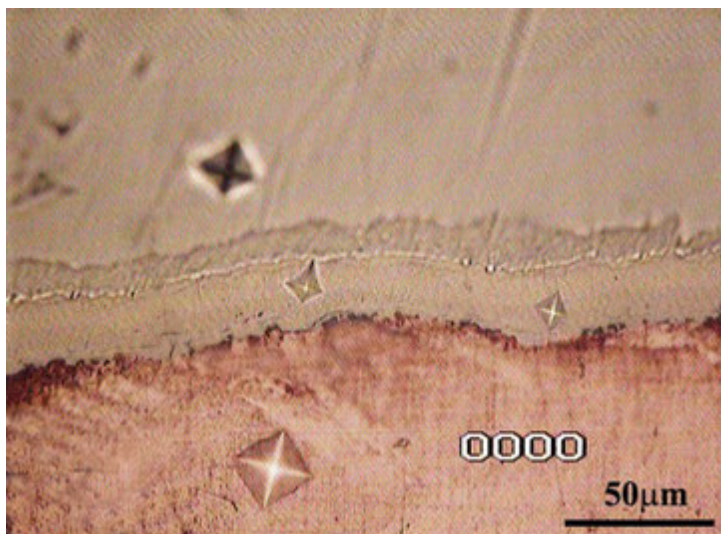
شکل 4- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از فصل مشترک تیتانیوم - نیکل الف) در دمای 055°C ب) دمای 005°C .
ج) 655°C



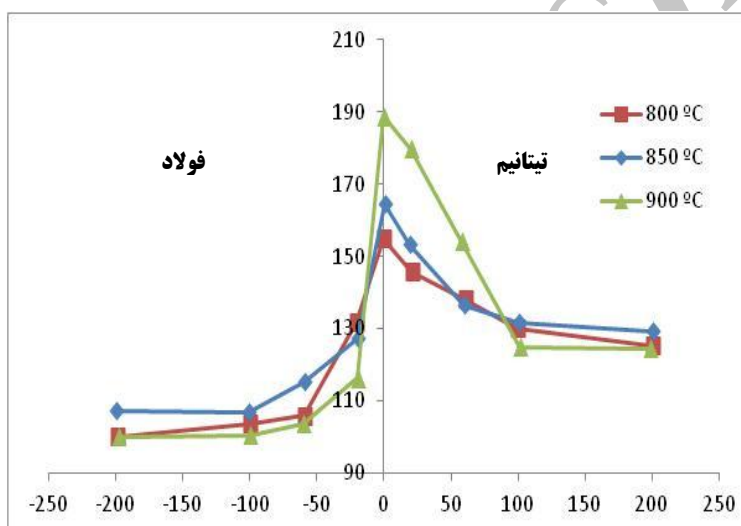
شکل 0- نتایج ناشی از آنالیز خطی از توزیع عناصر گوناگون در فصل مشترک تیتانیوم - فولاد در دمای 655°C .



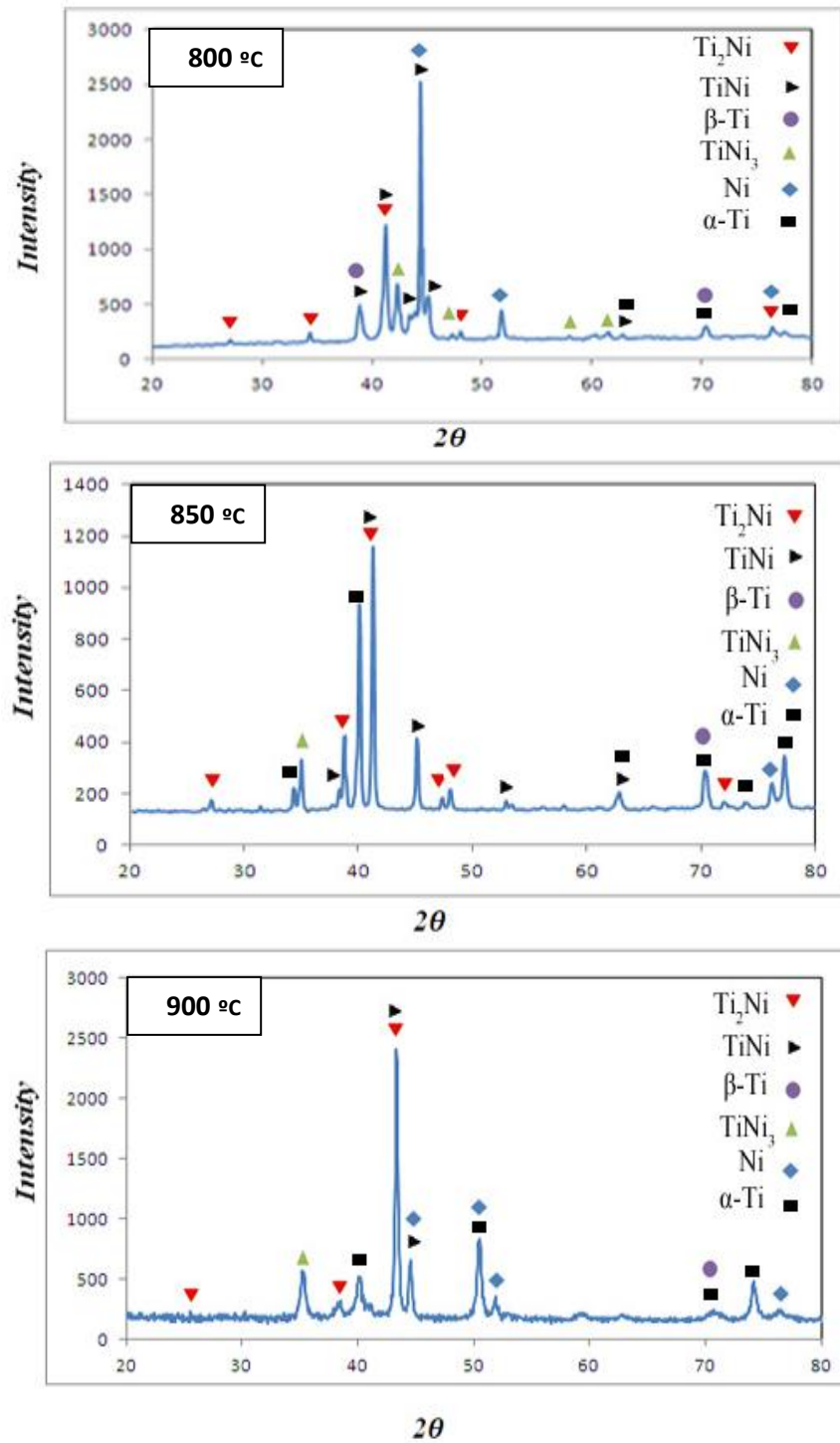
شکل 7- ساختار سوزنی شکل $\alpha+\beta$ در فصل مشترک اتصال تیتانیوم - نیکل در دمای 655°C .



شکل 6- تصویر میکروسکپ نوری از ریز سختی سنجی فصل مشترک اتصال نیکل-تیتانیوم.



شکل 0- نتایج حاصل از ریز سختی سنجی فواصل دور و نزدیک به فصل مشترک.



شکل 6- نتایج حاصل از آنالیز تفرق اشعه ایکس.