بررسی خواص مکانیکی اتصالات در لحیم کاری سخت آلیاژ Ti-۶Al-۴V به آلیاژ SS ۴۱۰ در شرایط خلا

رضا عشقی[۱*]، سید محمد مهدی هادوی[۲] و ولی‌ا... ورمزیار[۳]

۱- دانشکده مهندسی، مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲- پژوهشگاه مهندسی مواد و انرژی، کرج

۳- سازمان صنایع هوایی ایران، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۲/۲۷- دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۱/۱۶)

چکیده – در این پژوهش اتصال آلیاژ Ti-۶Al-۴V به فولاد زنگ نزن ۴۱۰ با استفاده از سه فلز پرکننده مختلف پایه نقره، پایه نیکل و پایه تیتانیوم با استفاده از عملیات لحیم‌کاری سخت در شرایط خلا مورد بررسی قرار گرفته است. برای دست‌یابی به فاصله توقف بهینه، عملیات لحیم‌کاری در سه فاصله توقف ۰/۰۲ ، ۰/۰۴ و ۰/۰۶ میلی‌متر انجام شد. بعد از انجام عملیات لحیم‌کاری اتصال‌ها از لحاظ استحکام و سختی مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری استحکام اتصالات لحیم شده نشان می‌دهد که اتصالات ایجاد شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم در فاصله توقف ۰/۰۲ میلی‌متر، دارای استحکام ۱۴۹/۵ مگاپاسکال است که حداکثر استحکام را نسبت به سایر نمونه‌های لحیم شده دارد.

واژگان کلیدی : لحیم کاری سخت، آلیاژ تیتانیوم، Ti-۶Al-۴V، فولاد زنگ نزن ۴۱۰ ، فاصله توقف.

Investigation of Mechanical Properties in Brazing of Ti-6Al-4V and SS410 in Vacuum

R. Eshghi[*1] , M.M. Hadavi[2] and V. Varmazyar[3]

1- Malek Ashtar University of Technology, Tehran
2- Materilas and Energy Research Center, Karaj
3- Iran Aviation Industries Organization, Tehran

Abstract: ***In this research, Ti-6Al-4V alloy was brazed with 410 stainless steel by three different filler metals as silver-base, nickel-base, and titanium-base alloys. In order to obtain optimum clearance, brazing was done in three different clearances***

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: reza412_eshghi@yahoo.com

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.1.1]

of 0.02, 0.04 and 0.06 mm. Also, the strength and hardness of the brazing zone were investigated. The results of shear strength showed that the brazed samples with titanium-base alloy at the clearance of 0.02 mm had the maximum strength among the different samples which was 149.5 MPa.

Keywords: *Brazing, Titanium alloy, Ti-6Al-4V, 410 stainless steel, Clearance.*

۱- مقدمه

امروزه فلز تیتانیوم و فولادهای زنگ نزن به علت خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب، کاربرد بسیار زیادی در صنایع نظامی، هوافضا، خودروسازی و امثال آن ها دارند ولی از آنجا که امکان ساخت سازه‌های فلزی معمولا به صورت یک‌پارچه وجود ندارد، ایجاد اتصال در ساخت چنین سازه‌هایی از اهمیت زیادی برخوردار است. اتصال تیتانیوم به دیگر فلزات همواره دارای اشکالاتی از قبیل بوجود آمدن فازهای بین فلزی ترد در محل اتصال و ایجاد اکسیدهای فلزی در صورت محافظت و کنترل نامناسب ناحیه اتصال است، که این موارد باعث کاهش استحکام ناحیه اتصال می‌شوند. برای اتصال دهی تیتانیوم به دیگر فلزات از روش‌های جوش‌کاری و لحیم‌کاری سخت و نرم استفاده می‌شود که از این بین لحیم‌کاری سخت دارای مزایای بهتری نسبت به روش‌های دیگر است [۱-۳].

در لحیم کاری، جریان مویینگی باعث پر شدن درز اتصال توسط فلز پرکننده و در نهایت به‌وجود آمدن پیوند متالورژیکی بین فلز پرکننده و فلزات پایه می‌شود که نتیجه آن اتصالی با استحکام و چقرمگی مناسب بر اساس شرایط طراحی خواهد بود [۴و۵]. برای رسیدن به این شرایط لازم است که فاصله توقف بهینه باشد. میزان فاصله توقف با توجه به شرایط کار و طراحی اتصال یکی از کلیدی‌ترین پارامترهاست. معمولا فاصله توقف در لحیم‌کاری سخت برای یک نیروی مویینگی مناسب و استحکام قابل قبول بر اساس شرایط طراحی و نوع فلز پرکننده بین ۰/۰۸-۰/۰۲ میلی‌متر طراحی می‌شود [۶و۷].

در یکی از محصولات هوایی، قطعه‌ای وجود دارد که از دو رینگ از جنس فولاد زنگ نزن۴۱۰ و پره‌هایی از جنس آلیاژ تیتانیوم (Ti-۶Al-۴ V) تشکیل شده است. از آنجا که کیفیت اتصال این دو قطعه بسیار کلیدی و مهم است، در این تحقیق سعی شده است که با کنترل و بهینه سازی عوامل اصلی فرایند لحیم کاری مانند فاصله توقف، به خصوصیات مکانیکی مناسب در فصل مشترک اتصال آلیاژ Ti-۶Al-۴V به فولاد زنگ نزن۴۱۰SS دست یافته، و فلز پرکننده مناسبی معرفی شود.

۲- روش پژوهش

در این پژوهش اتصال آلیاژ تیتانیوم (Ti-۶Al-۴V) به فولاد زنگ نزن ۴۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از هر کدام از آلیاژها نمونه‌هایی در ابعاد ۱×۳۰×۱۱۰ میلی‌متر تهیه شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۱) قابل مشاهده است. فلزات پرکننده مورد استفاده شامل فلز پرکننده پایه نیکل که دارای استاندارد۲- AWS BNi و یا AMS ۴۷۷۷ است، فلز پرکننده پایه نقره که در استاندارد AWS با مشخصه Bag-۸ نشان داده می‌شود و فلز پرکننده پایه تیتانیوم که با نام تجاری Ticuni شناخته می‌شود هستند که ترکیب شیمیایی هر کدام در جدول (۲) مشخص شده است. لازم به یادآوری است با توجه به اینکه تیتانیوم فلز بسیار فعالی است، برای جلوگیری از اثرات زیان‌آور نیتروژن و اکسیژن فرایند لحیم‌کاری سخت در یک کوره الکتریکی تونلی قابل برنامه ریزی با نام تجاری Lhomargy Adamel که توانایی تأمین حداکثر دمای ۱۸۰۰°C و تولید خلأ با فشار atm 10^{-5} را دارد استفاده شد. ورقه‌های فلزی قبل از لحیم‌کاری باید تمیز و عاری از هرگونه آلودگی (اکسید وچربی وغیره) باشند، بدین منظور برای لایه برداری سطحی ابتدا تسمه‌های برش خورده سندبلاست شدند ، سپس توسط محلول استون چربی گیری اولیه از سطح فلزات انجام شد. در ادامه سطح تمامی ورقه‌ها با سنباده کاربید سیلیسیم SiC به شماره ۶۰۰،۴۰۰،۸۰۰ و ۱۰۰۰ سنباده زنی شدند تا یک سطح هموار و مناسب و با زبری سطح یکنواخت در تمامی نمونه‌ها برای لحیم کاری فراهم شود. پس از سنباده زنی چربی گیری نهایی با محلول استون از سطح ورقه‌ها انجام شد.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.1.1]

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۴۱۰

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
بقیه	۰/۱۴	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۱۲/۶۷	۰/۲۱	۰/۱۰

با توجه به اینکه رابطه بین فاصله توقف با استحکام اتصالات یکی از پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش است، نمونه‌های آزمایشگاهی به حالت لبه روی هم با فاصله توقف مختلف طراحی شدند. به همین خاطر ابتدا تسمه‌های برش خورده تیتانیومی و فولادی به حالت لبه روی هم قرار گرفتند. برای رسیدن به حداکثر استحکام اتصالات، عرض منطقه همپوشانی اتصالات ۳ میلی‌متر انتخاب شد و برای ایجاد فاصله‌های توقف مد نظر صفحاتی با ضخامت ۰/۰۲، ۰/۰۴و ۰/۰۶ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. سپس برای ثابت ماندن این فاصله و حالت طراحی شده به وسیله روش جوشکاری TIG دو خال جوش در دو لبه کناری منطقه همپوشانی زده شد. لحیم کاری با فلز پرکننده پایه نیکل در دمای ۱۰۶۰±۱۰°C و زمان پنج دقیقه انجام شد. لحیم کاری با فلز پرکننده پایه نقره در دمای°C ۸۲۰±۱۰ و زمان ۳۰ ثانیه صورت گرفت و لحیم کاری با فلز پرکننده پایه تیتانیوم در دمای ۹۸۰±۱۰°C و زمان یک دقیقه صورت پذیرفت که مبنا و معیار انتخاب این دماها بر اساس تجربه کارشناسان دانش لحیم کاری صورت پذیرفته است.

میزان استحکام اتصالات لحیم شده توسط دستگاه کشش صورت گرفت. در ابتدا نمونه‌های لحیم شده توسط دستگاه برش سیمی و مطابق استاندارد AWS C3.2M برش زده شدند که تصویری از نمونه برش خورده در شکل (۱) نشان داده شده است. سپس در بین دو فک دستگاه قرار داده شدند. فک‌های دستگاه نیرو را بر نمونه وارد ساخت تا آنجا که نمونه‌ها دچار شکست شدند و از روی نمودار نیرو-تغییر طول، میزان استحکام شکست نمونه‌ها ثبت شد. لازم به ذکر است اولین کاهش شدید نیرو که توسط دستگاه نشان داده شد به منزله ایجاد ترک در فصل مشترک تلقی شد و ماکزیمم عدد ثبت شده نیز به عنوان نیروی لازم برای شکست در محاسبات در

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده

عنصر / پرکننده	Ni	Cr	Si	B	Fe	Ag	Cu	Ti
پایه نیکل	۸۲	۷	۴/۵	۳/۱	۳/۴	--	--	--
پایه تیتانیوم	۱۵	--	--	--	--	--	۱۵	۷۰
پایه نقره	--	--	--	--	--	۷۲	۲۸	--

نظر گرفته شد که با تقسیم این نیرو بر سطح مقطع قسمت لحیم شده مقدار تنش برشی اتصالات لحیم شده به دست آمد.

برای ارزیابی سختی منطقه لحیم شده و فلزات پایه، آزمایش ریز سختی روی سطح مقطع نمونه‌های لحیم شده که در مراحل قبلی مانت شده بودند انجام گرفت. آزمایش با استفاده از یک وزنه ۲۰۰ گرمی انجام گرفت و سختی نقاطی روی فلزات پایه و منطقه لحیم شده اندازه گیری شد و در نهایت نمودار سختی هر اتصال ترسیم شد.

برای بررسی مناطق مختلف لحیم و تهیه تحلیل عنصری از این مناطق از میکروسکوپ الکترونی استفاده شد. با توجه به اینکه نفوذ عناصر از فلزات پایه به داخل فلز پرکننده و بالعکس امری محتمل در لحیم کاری است و نفوذ این عناصر موجب تشکیل ترکیبات مختلف می‌شود، علاوه بر تحلیل خطی، تصاویری نیز از چگونگی توزیع عناصر در ناحیه لحیم گرفته شد تا با بررسی این تحلیل ها بهتر بتوان در مورد نفوذ انجام شده بحث کرد.

۳-بحث و نتیجه گیری

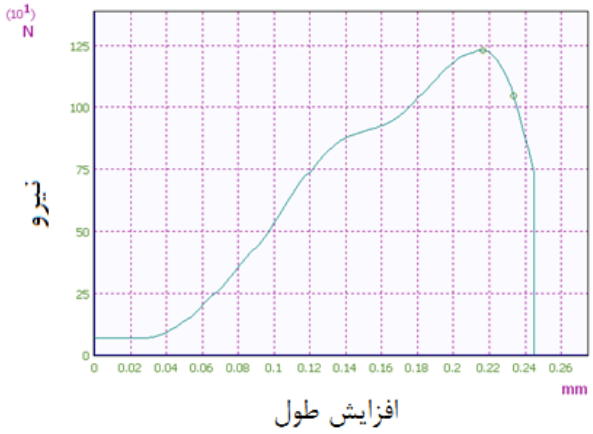
۳-۱-نتایج اثر فاصله توقف بر استحکام برشی

نتایج ارزیابی میزان استحکام برشی نمونه‌های لحیم شده با فلز پرکننده پایه نیکل در شکل‌های(۲) تا (٤) آمده است. این تصاویر مربوط به نمودار نیرو-تغییر طول است که برای تمامی فاصله‌های توقف اندازه‌گیری شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در اکثر موارد حالت شکست به صورت نرم رخ داده

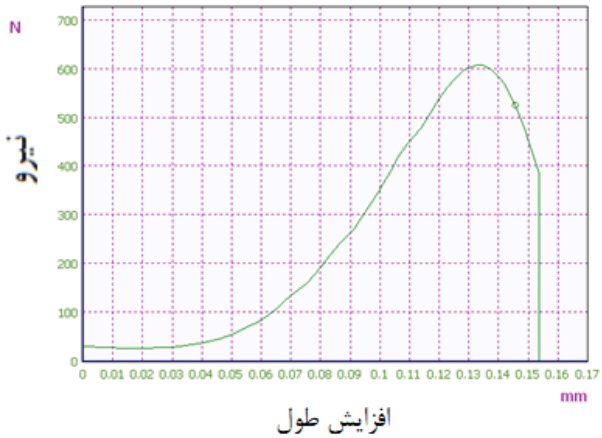
[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.1.1]

(ب) (الف)

شکل ۱- نمونه‌های برش خورده برای آزمایش استحکام اتصالات (الف) نمونه‌های لحیم شده با فلز پرکننده پایه نیکل (ب) نمونه‌های لحیم شده با فلز پرکننده پایه



شکل ۲- نمودار نیرو-تغییر طول مربوط به نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه نیکل با فاصله توقف۰/۰۲ میلی‌متر

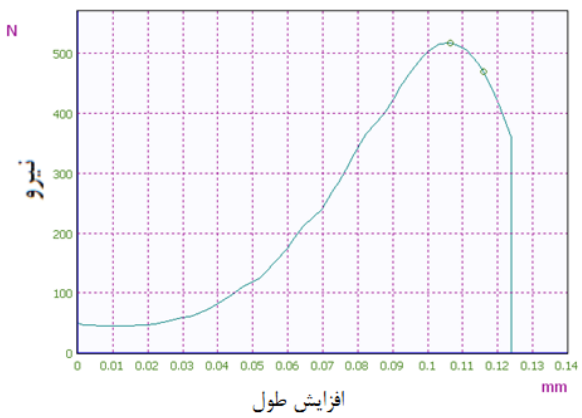


شکل ۳- نمودار نیرو-تغییر طول مربوط به نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه نیکل با فاصله توقف ۰/۰۴میلی‌متر

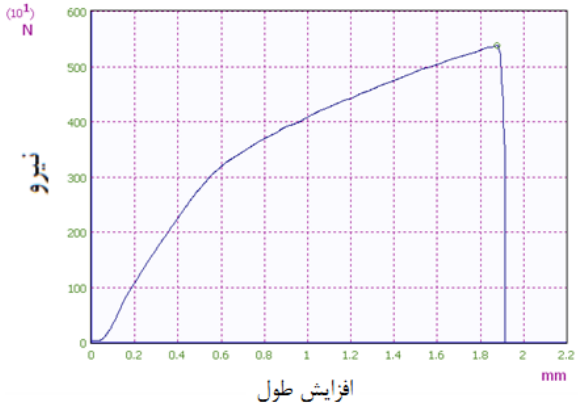
است. برای مقایسه بهتر میزان استحکام اتصالات در فاصله‌های توقف مختلف، خلاصه نتایج در جدول (۳) ثبت شده است. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، نیروی لازم برای شکست اتصال در نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه نیکل با فاصله توقف ۰/۰۲ میلی‌متر، ۱۲۳۲ نیوتن بدست آمده است در حالیکه مطابق با شکل (۳) این مقدار نیرو برای نمونه لحیم شده با فاصله توقف۰/۰۴ میلی‌متر،۶۰۷ نیوتن و مطابق با شکل (۴) برای نمونه لحیم شده با فاصله توقف ۰/۰۶ میلی‌متر،۵۱۸ نیوتن اندازه‌گیری شده است.

نتایج بدست آمده از آزمون استحکام برشی تعدادی از نمونه‌های لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم در شکل‌های (۵) تا (۷) نشان داده شده است و نتایج مربوطه در جدول (۴) ثبت شده است. شکل (۵) نمودار نیرو- تغییر طول را برای نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم با فاصله توقف ۰/۰۲ میلی‌متر نشان می‌دهد. همان گونه که نمودار نیرو- تغییر طول مربوط به نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم با فاصله توقف ۰/۰۲ میلی‌متر نشان می‌دهد، نیروی لازم برای شکست و گسیختگی در اتصالات بیش از ۵۰۰ نیوتن است. نمودار نیرو- تغییر طول برای نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم با فاصله توقف ۰/۰۴ میلی‌متر در شکل (۶) قابل مشاهده است. همانطور که در این نمودار دیده می‌شود، مقدار نیروی لازم برای شکست در

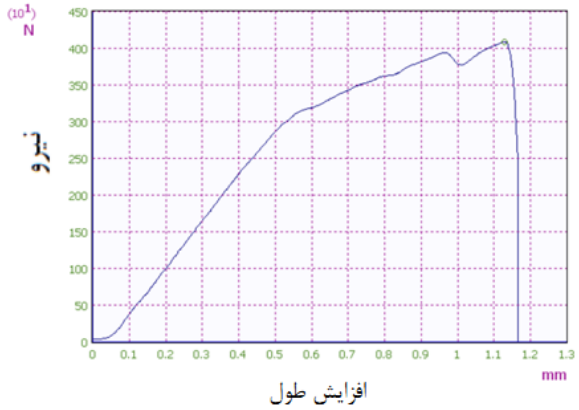
[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.1.1]



شکل ۴- نمودار نیرو-تغییر طول مربوط به نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه نیکل با فاصله توقف ۰/۰۶ میلی‌متر



شکل ۵- نمودار نیرو-تغییر طول مربوط به نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم با فاصله توقف ۰/۰۲ میلی‌متر



شکل ۶- نمودار نیرو-تغییر طول مربوط به نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم با فاصله توقف ۰/۰۴ میلی‌متر

شکل ۷- نمودار نیرو-تغییر طول مربوط به نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم با فاصله توقف ۰/۰۶ میلی‌متر

جدول ۳- اثر فاصله توقف بر میزان استحکام برشی اتصالات لحیم شده با فلز پرکننده پایه نیکل

تنش (مگاپاسکال)	نیرو (نیوتن)	فاصله توقف (میلی‌متر)
۳۴/۲	۱۲۳۲	۰/۰۲
۱۷	۶۰۷	۰/۰۴
۱۴/۳	۵۱۸	۰/۰۶

جدول ۴- اثر فاصله توقف بر میزان استحکام برشی اتصالات لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم

کمترین تنش (مگاپاسکال)	تنش میانه (مگاپاسکال)	بیشترین تنش (مگاپاسکال)	تنش میانگین (مگاپاسکال)	فاصله توقف (میلی‌متر)
۱۴۵/۵	.....	۱۴۹/۵	۱۴۷/۵	۰/۰۲
۱۱۳/۵	۱۱۴/۵	۱۱۷	۱۱۵	۰/۰۴
۱۰۰	۱۰۴/۳	۱۱۳	۱۰۲/۴	۰/۰۶

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.1.1]

این اتصالات نسبت به نمونه لحیم شده با فاصله توقف ۰/۰۲ میلی‌متر کاهش یافته، در حدود ۴۰۰ نیوتن است. شکل (۷) نمودار نیرو-تغییر طول برای نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم که دارای فاصله توقف ۰/۰۶ میلی‌متراست را نشان می‌دهد. از مقایسه نمودار نیرو تغییر طول نمونه‌های لحیم شده با فاصله توقف ۰/۰۶ میلی‌متر با نمونه‌های لحیم شده با فاصله‌های توقف ۰/۰۲ و ۰/۰۴ میلی‌متر مشخص می‌شود که نیروی شکست کاهش چشم‌گیری داشته، به کم‌تر از ۴۰۰ نیوتن رسیده است. نتایج به دست آمده از آزمون استحکام برشی نمونه‌های لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم در جدول (۴) قابل مشاهده است.

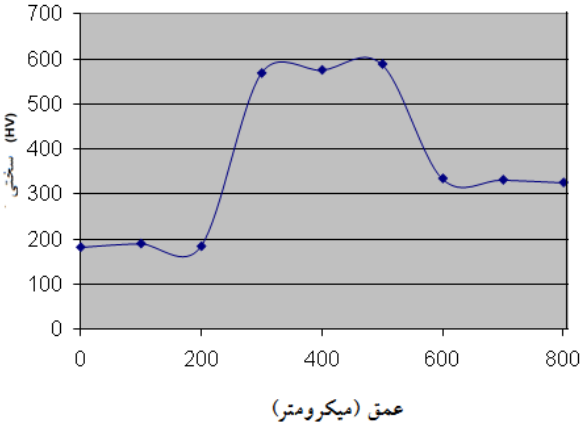
در لحیم کاری، جریان مویینگی باعث پر شدن درز اتصال می‌شود و در جریان این فرایند یک پیوند متالورژیکی مناسب بین فلز پرکننده و فلزات پایه بوجود می‌آید که نتیجه آن اتصالی با استحکام و چقرمگی مناسب بر اساس شرایط طراحی خواهد بود. برای رسیدن به این شرایط لازم است که فاصله توقف کم و در حد بهینه طراحی شود تا از رسوب کردن فازهای تردی که از عناصر موجود در فلز پرکننده و فلز پایه بوجود می‌آید، جلوگیری شود. میزان فاصله توقف با توجه به شرایط کار و طراحی اتصال یکی از کلیدی ترین عوامل است و شروع انتخاب یک فاصله توقف مناسب نیز با انتخاب فلز پرکننده آغاز می‌شود. سایر عواملی که در انتخاب فاصله توقف یک اتصال بهینه تأثیر دارد، دمای لحیم-کاری و واکنش‌های متالورژیکی بین لحیم با فلزات پایه است. معمولاً فاصله توقف در لحیم کاری سخت برای یک نیروی موئینگی مناسب و استحکام قابل قبول بر اساس شرایط طراحی و نوع فلز پرکننده بین ۰/۰۸-۰/۰۲ میلی‌متر طراحی می‌شود [۸-۱۰].

بررسی نتایج بدست آمده از آزمون استحکام برشی اتصالات نشان می‌دهد که در فاصله توقف۰/۰۲میلی‌متر مقدار استحکام اتصالات بیش تر از مقدار استحکام بدست آمده در دیگر فاصله‌های توقف است، به طوریکه در این فاصله توقف برای نمونه‌های لحیم شده با فلز پرکننده پایه نیکل و تیتانیوم میزان استحکام به ترتیب ۳۴/۲ و ۱۴۷/۵ مگاپاسکال بدست آمده است. این تفاوت در استحکام اتصالات لحیم شده می‌تواند به تفاوت در نحوه جاری شدن فلزات پرکننده در ناحیه اتصال مربوط باشد. با افزایش فاصله توقف به ۰/۰۴ میلی‌متر، استحکام اتصالات لحیم شده با فلز پرکننده پایه نیکل تا ۵۰٪ کاهش داشته، به ۱۷ مگاپاسکال رسیده است. در نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم و با فاصله توقف ۰/۰۴ میلی‌متر نیز استحکام اتصالات نسبت به نمونه‌های لحیم شده با فاصله توقف ۰/۰۲ میلی‌متر کاهش۲۲٪ داشته، به ۱۱۵ مگاپاسکال رسیده است. با افزایش بیش تر فاصله توقف به ۰/۰۶ میلی‌متر روند نزولی استحکام اتصالات ادامه دارد، به نحوی که در نمونه‌های لحیم شده با فلز پرکننده پایه نیکل میزان استحکام، با ۱۴٪ کاهش به ۱۴/۳ و در نمونه‌های لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم با ۱۱٪ کاهش به ۱۰۲/۴ مگاپاسکال رسیده است.

دلیل این کاهش استحکام با افزایش فاصله توقف، اختلاف در واکنش‌های صورت گرفته در فصل مشترک فلزات پایه با فلز پرکننده مذاب و نحوه پر شدن ناحیه اتصال توسط فلز پرکننده است. با افزایش فاصله توقف و کاهش نیروی مویینگی، فلز پرکننده مذاب نمی‌تواند به خوبی درز اتصال را پر کند،در نتیجه واکنش‌های متالورژیکی لازم برای ایجاد اتصالی با استحکام مناسب ایجاد نمی‌شود و افت استحکام اتصالات به وقوع می‌پیوندد [۱۱-۱۳].

ورود اتم‌های محلول در شبکه اتم حلال می‌تواند باعث استحکام‌دهی آن شود و عواملی که تشکیل این محلول‌های جامد را کنترل می‌کنند، عمدتا در بررسی‌های هیوم-روتری[1] مشخص شده‌اند. با توجه به اطلاعات موجود در جدول مندلیف Ti-۶Al-۴V سازگاری مناسبی با فلز پرکننده تیتانیومی دارد. در ضمن شرایط لازم برای انحلال عناصر موجود در فولاد زنگ نزن در فلز پرکننده پایه تیتانیومی موجود است که در نهایت این موارد نیز منجر به استحکام بخشی ناحیه لحیم شده است.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.1.1]

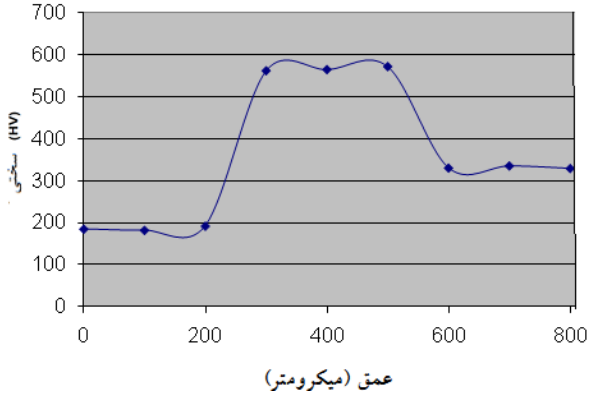


شکل ۸- نمودار ریز سختی سنجی برای نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم با فاصله توقف ۰/۰۲ میلی‌متر

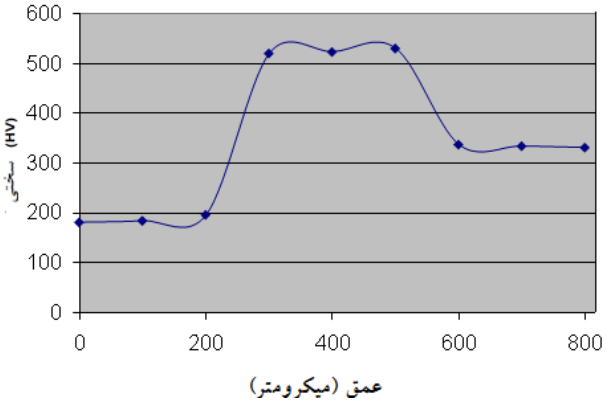
۳-۲- نتایج اثر فاصله توقف بر سختی

نتایج بدست آمده از آزمون ریزسختی در ناحیه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم و فلزات پایه در فاصله‌های توقف مختلف در شکل‌های (۸) تا (۱۰) قابل مشاهده است. شکل(۸) مربوط به نمودار ریز سختی سنجی برای نمونه‌های لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم با فاصله توقف ۰/۰۲ میلی‌متر است.. قسمت ابتدایی این نمودار سختی فولاد زنگ‌نزن را نشان می‌دهد که میانگین این سختی در حدود HV ۱۹۰ است. در فصل مشترک فولاد زنگ نزن با فلز پرکننده پایه تیتانیوم سختی به شدت افزایش و به HV ۶۰۰ رسیده است. سختی ناحیه لحیم با دور شدن از فلزات پایه، کاهش و معادل با HV ۵۸۵ شده است. در نزدیکی فصل مشترک فلز پرکننده پایه تیتانیوم با Ti-۶Al-۴V سختی مجددا افزایش و به مقدار HV ۶۰۵ رسیده است. قسمت انتهایی نمودار مربوط به سختی Ti-۶Al-۴V است که در حدود HV ۳۱۰ اندازه گیری شده است. نتایج ریز سختی برای نمونه‌های لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم که دارای فاصله توقف ۰/۰۴ میلی‌متراند در شکل (۹) نشان داده شده است.

قسمت ابتدایی این نمودار سختی فولاد زنگ نزن را نشان می‌دهد که میانگین این سختی در حدود HV ۱۸۵ است. در فصل مشترک فولاد زنگ نزن با فلز پرکننده پایه تیتانیوم سختی



شکل ۹- نمودار ریز سختی سنجی برای نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم با فاصله توقف ۰/۰۴ میلی‌متر



شکل ۱۰- نمودار ریزسختی سنجی برای نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم با فاصله توقف ۰/۰۶ میلی‌متر

به شدت افزایش و به HV ۵۹۰ رسیده است. سختی ناحیه لحیم با دور شدن از فلزات پایه به HV ۵۷۵ کاهش یافته است. در نزدیکی فصل مشترک فلز پرکننده پایه تیتانیوم با Ti-۶Al-۴V سختی مجددا افزایش و به مقدار HV ۵۸۵ رسیده است. قسمت انتهایی نمودار مربوط به سختی Ti-۶Al-۴V و در حدود HV ۳۱۰ است. شکل (۱۰) نمودار ریزسختی را برای نمونه‌های لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم که فاصله توقف در آنها ۰/۰۶ میلی‌متر است نشان می‌دهد. قسمت ابتدایی این نمودار سختی فولاد زنگ نزن را نشان می‌دهد که میانگین این سختی در حدود HV ۱۸۵ و مشابه نمونه‌های لحیم شده قبلی است. در فصل مشترک فولاد زنگ نزن با فلز پرکننده پایه تیتانیوم سختی به شدت افزایش و به HV ۵۲۰ رسیده است.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.1.1]

سختی ناحیه لحیم با دور شدن از فلزات پایه، کاهش و به HV ۵۰۵ رسیده است. در نزدیکی فصل مشترک فلز پرکننده پایه تیتانیوم با Ti–۶Al–۴V سختی مجددا افزایش یافته، به مقدار HV ۵۲۵ رسیده است. قسمت انتهایی نمودار مربوط به سختی Ti–۶Al–۴V است که در حدود HV ۳۱۰ اندازه گیری شده است.

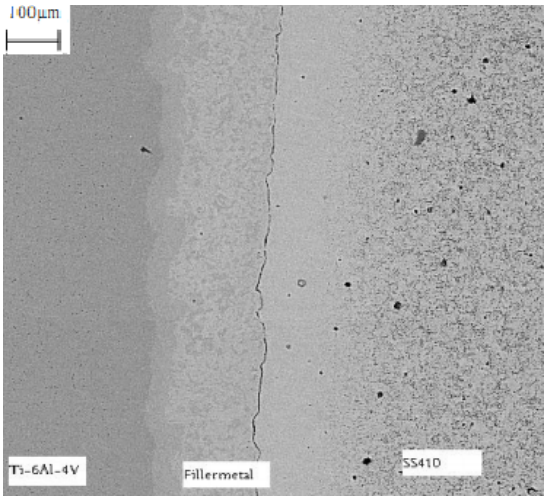
مقایسه مقدار سختی نمونه‌های لحیم شده نشان می‌دهد که سختی فلزات پایه با فاصله توقف تغییری نداشته است اما سختی ناحیه لحیم و فصل مشترک اتصالات لحیم شده با فلزات پایه با افزایش فاصله توقف کاهش چشم‌گیری از خود نشان می‌دهد.

اگر فاصله توقف بهینه باشد زمان لازم برای تماس با فلزات پایه و پر شدن کامل درز اتصال فراهم است، به همین خاطر در این شرایط، مباحثی که در مورد مکانیزم مستحکم شدن ناحیه لحیم عنوان شد، منجر به افزایش سختی ناحیه لحیم نیز می‌شود. اگر فاصله توقف از مقدار بهینه افزایش یابد شرایط به گونه‌ای است که کاهش استحکام و سختی به وقوع می‌پیوندد، زیرا که در این فاصله توقف مذاب به علت کاهش نیروی مویینگی نمی‌تواند به طور کامل درز اتصال را پر کند، پس در این شرایط واکنش مناسبی بین فلز پرکننده و فلزات پایه رخ نمی‌دهد. زمانی که واکنش مناسبی صورت نگیرد، نفوذ عناصر از فلزات پایه به داخل لحیم و از لحیم به داخل فلز پایه کاهش خواهد یافت و توزیع مناسب رسوبات و مستحکم شدن ناحیه لحیم انجام نخواهد شد و این عامل همراه با حفرات ایجاد شده باعث کاهش سختی و استحکام خواهد شد.

نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی سختی فلزات پایه و ناحیه اتصال در شرایط تغییر فاصله توقف و تأثیر این تغییرات بر سختی اتصال و فلزات پایه نشان می‌دهد. سختی ناحیه اتصال در فصل مشترک با فلزات پایه بالاتر از دیگر نقاط ناحیه اتصال می‌باشد. به طور مثال برای نمونه‌ای با فاصله توقف ۰/۰۲ میلی‌متر، سختی ناحیه فصل مشترک فلز پرکننده با فولاد زنگ‌نزن نزدیک HV۶۰۰ بوده است. بالا بودن سختی در فصل مشترک فلز پرکننده پایه تیتانیوم با فولاد زنگ نزن را می‌توان به دلیل حضور ذرات آهن و رسوب این ذرات در ناحیه اتصال دانست (شکل (۱۶)). با توجه به اینکه میزان این ذرات در این ناحیه بیش تر از دیگر نقاط ناحیه لحیم است، سختی ایجاد شده حاصل از این رسوبات نیز بیش تر از دیگر نقاط است. با دور شدن از فولاد زنگ نزن و کاهش ذرات رسوبی، سختی کاهش و به HV ۵۷۵ رسیده است و به طورمجدد با نزدیک شدن به Ti–۶Al–۴V و لایه واکنشی ایجاد شده در جلو این فلز پایه، سختی افزایش و به مقدار HV۵۹۰ رسیده است. در مورد سایر نمونه‌ها نیز وضعیت مشابه بوده است و سختی در فصل مشترک فلزات پایه با فلز پرکننده بیش تر از سایر نقاط بوده است.

استحکام و سختی اتصالات مطرح شده وابسته به واکنش‌های شیمیایی و انحلال و نفوذ عناصر است که خود این عوامل نیز وابسته به زمان و دما اند. دما مهمترین عامل موثر بر نفوذ است، هم چنین دما بر روی انرژی سطحی مذاب – جامد نیز تأثیر گذار است و کاهش آن باعث افزایش γ_{SI} و در نتیجه افزایش زاویه ترشوندگی می‌شود. زمان نیز عامل مهمی در پدیده نفوذ و مسافت واکنش عناصر موجود در فلز پرکننده به داخل فلزات پایه و برعکس است. در این پژوهش سعی شده با استفاده از دستورالعمل‌های لازم زمان و دمای بهینه در مورد فلزات پرکننده استخراج و به کار گرفته شود، زیرا در دما و زمان بهینه با تشکیل لایه واکنشی و ایجاد فصل مشترک که ناشی از نفوذ عناصر و جذب عناصر از فلزات پایه به داخل لحیم و بالعکس است ترکنندگی و چسبندگی رخ می‌دهد . در این شرایط ضخامت فصل مشترک نیز بهینه خواهد بود و منجر به اتصالی با استحکام بیش‌تر می‌شود. در دما و زمان‌های کم‌تر، ضخامت فصل مشترک و میزان رسوبات آهن داخل لحیم و در نتیجه استحکام کم می‌شود. افزایش بیش‌تر دما و زمان نسبت به حالت بهینه آن منجر به ضخیم تر شدن بیش از حد فصل مشترک و انحلال فلز پایه می‌شود و در ضمن درشت شدن رسوبات آهن داخل لحیم را در پی خواهد داشت که این موارد نیز باعث کاهش استحکام می‌شود. هم چنین باید توجه داشت که شرایط دمایی و زمانی مختلف منجر به تغییر ترکیب شیمیایی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.1.1]

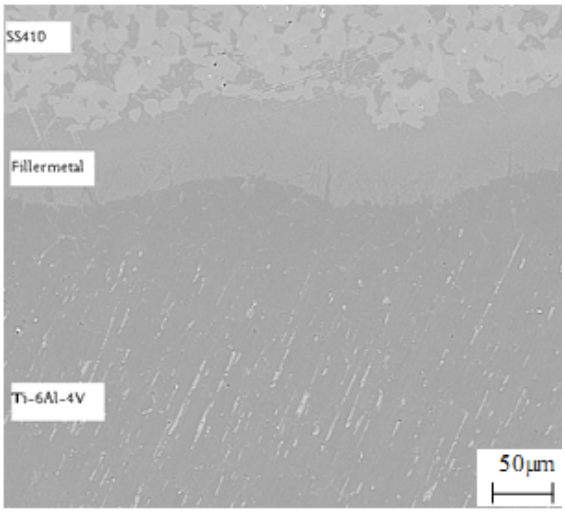


شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ناحیه لحیم

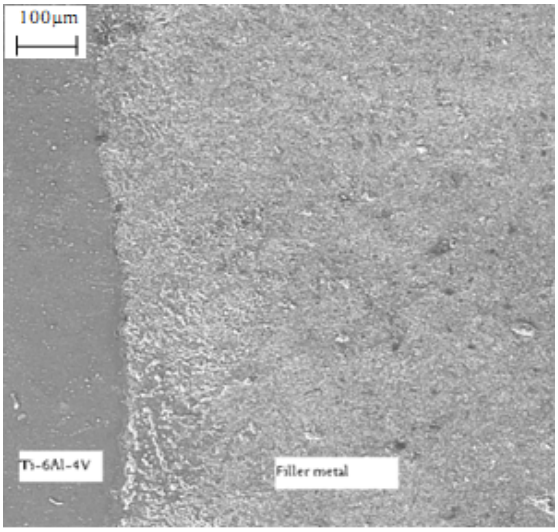
فلز پرکننده طی لحیم کاری می‌شود. این تغییر به واسطه واکنش انحلالی بین فلز پرکننده و فلزات پایه است که می‌تواند منجر به تشکیل ترکیبات بین فلزی شود. این ترکیبات بین فلزی می‌توانند به صورت محلول جامد و یا ترکیباتی باشند که منجر به افزایش استحکام ناحیه فصل مشترک و خود لحیم شوند یا ترکیبات بین فلزی ترد باشند که باعث کاهش استحکام شوند. حضور ترکیبات بین فلزی یکی از نگرانی‌های اصلی در لحیم کاری است، اما انتخاب دما و زمان مناسب از بروز آن جلوگیری می‌کند. لذا در این پژوهش سعی شده است که دما و زمان لحیم کاری در محدوده‌ای باشد که امکان ایجاد مجموعه‌ای پیوسته از ترکیبات بین فلزی ترد میسر نشود.

۳-۳- نتایج بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و تحلیل خطی شیمیایی (EDS)

تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرفته شده از ناحیه لحیم و فلزات پایه در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و(۱۳) قابل مشاهده است. همانطور که در این تصاویر مشخص است فلز پرکننده پایه تیتانیوم به خوبی درز اتصال را پرکرده، توانسته است اتصال مناسبی بین فلزات پایه ایجاد نماید. دلیل بالا بودن استحکام ناحیه اتصال لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم نسبت به



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ناحیه لحیم

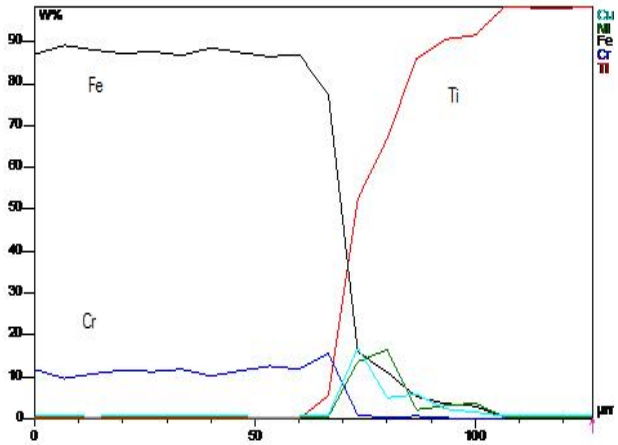


شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) گرفته شده از فصل مشترک فلز پرکننده و آلیاژ Ti-۶Al-۴V

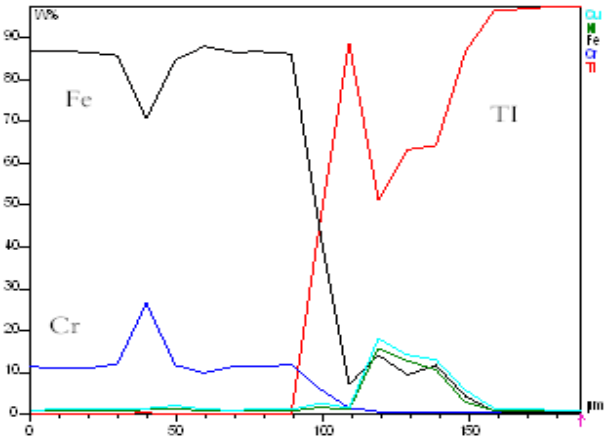
فلزات پرکننده دیگر مربوط به نحوه جاری شدن فلز پرکننده در درز اتصال و پرکردن ناحیه اتصال است که در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به خوبی نشان داده شده است.

شکل (۱۳) تصویر (SEM) گرفته شده از فصل مشترک فلز پرکننده پایه تیتانیوم و آلیاژ Ti-۶Al-۴V است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود فصل مشترک فلز پرکننده پایه

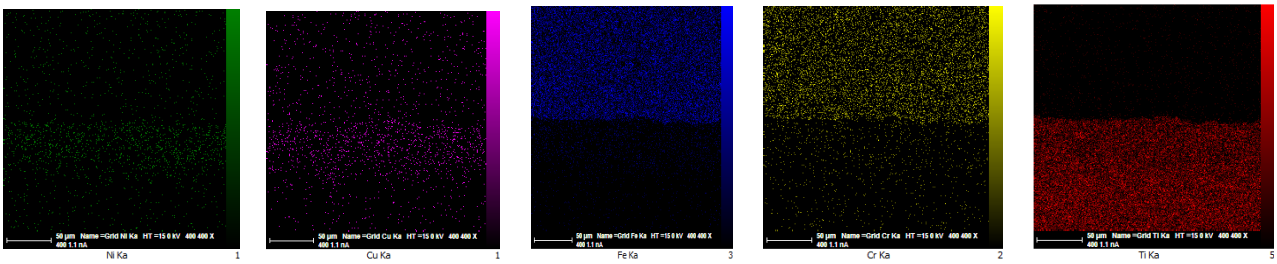
[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.1.1]



شکل ۱۴-تحلیل خطی شیمیایی در ناحیه لحیم و فلزات پایه برای نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم



شکل ۱۵- تحلیل خطی شیمیایی در ناحیه لحیم و فلزات پایه برای نمونه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم



(الف) **(ب)** **(ج)** **(د)** **(ه)**

شکل ۱۶- توزیع عناصر در مناطق مختلف لحیم و فلزات پایه الف-تیتانیوم، ب-کروم، ج-آهن، د-نیکل و ه-مس

تیتانیوم و آلیاژ Ti-۶Al-۴V عاری از هر گونه عیوبی مانند ترک و حفره است که نشان می‌دهد فلز پرکننده پایه تیتانیوم، فلز پرکننده مناسبی به متظور لحیم کاری برای این فلزات پایه است.

تحلیل خطی شیمیایی گرفته شده از ناحیه لحیم شده با فلز پرکننده پایه تیتانیوم و فلزات پایه در شکل (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهد نفوذ عناصری مانند آهن و کروم از فولاد زنگ نزن و تیتانیوم از Ti-۶Al-۴V به داخل ناحیه لحیم به وقوع پیوسته است. همانطور که در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مشخص است Fe موجود در فولاد زنگ‌نزن به ناحیه اتصال نفوذ کرده است و این مقدار در فصل مشترک فولاد زنگ نزن با فلز پرکننده بیشترین مقدار می‌باشد. با افزایش فاصله از فولاد زنگ نزن به سمت Ti-۶Al-۴V از میزان نفوذ آهن کاسته شده است و با نزدیکتر شدن به Ti-۶Al-۴V میزان نفوذ با کاهش بیش‌تری مواجه شده است. نفوذ عناصری مانند آهن و کروم از فولاد زنگ نزن به فلز پرکننده پایه تیتانیوم مذاب و انحلال و رسوب این عناصر در منطقه لحیم عامل دیگری در مستحکم شدن اتصالات است. با افزایش فاصله از فولاد زنگ نزن به سمت ناحیه لحیم، عمق نفوذی این عناصر کاهش یافته است و این کاهش عمق نفوذی با افزایش فاصله توقف بیش‌تر می‌شود. یعنی در فاصله توقف ۰/۰۲ میلی‌متر در ناحیه اتصال میزان آهن و کروم بیشترین و در فاصله توقف ۰/۰۶ میلی‌متر این مقدار کمترین است که این امر نیز باعث کاهش استحکام اتصالات در فاصله توقف ۰/۰۶

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.1.1]

میلی‌متر نسبت به حالت بهینه می‌شود. در مورد کروم نیز این کاهش نفوذ اتفاق افتاده است. در بعضی گزارشات وجود لایه پیوسته‌ای از تیتانیوم در ناحیه لحیم به عنوان مانعی در برابر نفوذ آهن و کروم شناخته شده است. در این شکل توزیع عناصری مانند مس و نیکل نیز نشان داده شده است، همانگونه که مشخص است تمرکز این عناصر در ناحیه لحیم بیش‌تر از سایر قسمت‌ها بوده است.

از شکل (۱۴) و (۱۵) مشخص است که ناحیه لحیم، غنی از تیتانیوم، مس، نیکل است و مقداری از ذرات آهن و کروم در آن وجود دارد که دلیل افزایش استحکام و سختی در ناحیه لحیم به حضور همین ذرات توزیع شده در ناحیه لحیم نسبت داده می‌شود.

وجود لایه پیوسته‌ای از تیتانیوم در ناحیه لحیم به عنوان مانعی در برابر نفوذ آهن و کروم شناخته شده است. شکل (۱۶) نیز توزیع عناصر مطرح شده را به گونه‌ای دیگر نشان می‌دهد. در این شکل توزیع عناصری مانند مس و نیکل نیز نشان داده شده است، همانگونه که مشخص است تمرکز این عناصر در ناحیه لحیم بیش‌تر از سایر قسمت‌ها بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

۱- با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات خواص مکانیکی مشخص شد فلز پرکننده پایه تیتانیومی نسبت به دیگر فلزات پرکننده مورد استفاده، شرایط مناسب تری برای لحیم کاری داراست.

۳- در حالت بهینه احتمال تشکیل حفره و یا حفرات انقباضی در زمانی که فلز پرکننده در حال منجمد شدن است نسبت به دیگر شرایط کم‌تر است. یک اتصال بهینه زمانی حاصل می‌شود که سرتاسر اتصال تر و فاصله توقف به وسیله جریان یافتن مناسب فلز پرکننده در ناحیه اتصال کامل پرشده باشد.

۴- در فاصله توقف خیلی بیش‌تر فشار در ناحیه لحیم کاهش می‌یابد زیرا هر چه فاصله توقف بیشتر باشد فشار مویینگی کم‌تر است، پس عدم پرشدن کامل اتصال و حضور مک و حفره می‌تواند در خواص ناحیه اتصال در این شرایط تأثیر گذار باشد.

مراجع

1. Elrefaey , A and Tillmann ,W , "Correlation between Microstructure , Mechanical Properties and Brazing Temperature of Steel to Titanium Joint" , *Journal of Alloys and Compounds* , Vol. 487, PP. 639- 645, 2009.
2. Elrefaey, A and Tillmann, W, "Effect of Brazing Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Joints" **,** *Journal of Materials Processing Technology* , Vol. 209 ,PP. 4842– 4849, 2009.
3. Yue , X and He, P, "Microstructure and Interfacial Reactions of Vacuum Brazing Titanium Alloy to Stainless Steel Using an Agcuti Filler Metal", *Materials Characterization* , Vol. 59, PP. 1721 - 1725 , 2008.
4. Zhang, P, Brazing Manual,*"Furnace Brazing"* AWS BRM, 1992, Chapter 10, PP 173-183.
5. Kohl, W, Brazing Manual *"Brazing"* AWS WHB-2, Chapter 12, PP 401-409, 1990.
6. Schwartz, M.M, "*Brazing*", ASM International, OH, 1990.
7. Paul , J.F , "Soldering and Brazing of Stainless Steel" , *Metals Engineering Quarterly American Society for Metals* ,Vol. 5, pp. 50-51, 1967.
8. Schwartz M.M, *Metals Joining Manual*, 2rd edition , New York, 1979.
9. Nicholus M.G, *Joining Processes*, 2rd edition ,Koluwer academic publisher , London, 1998.
10. Humpston, G and Jacobson, D. M , *Principles of Soldering and Brazing*, USA, 1993.
11. Lashko, N and Lashko, S, *Brazing and Soldering of Material*, 2nd edition, Moscow,1979.
12. Wolfgang, H, *Principle of Brazing Technology*, 2nd edition, Braze tec, New York, 2001.
13. Olson , D.L and Siewert, T.A ,"Welding, *Brazing and Soldering"*, 1st ed., Vol. 6 , The ASM Handbook Committee, New York, pp. 114-126, 1991.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1393.33.3.1.1]