



ساخت کپسول مینیاتوری تیتانیومی برای چشمه‌های براکی تراپی به روش جوشکاری قوسی تنگستن در محیط گازی بی اثر (تی‌آی‌جی TIG)

رضا نقدی*^۱، شهاب شبیبانی^۱، مرتضی تمیزی‌فر^۲

۱. پژوهشکده علوم هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

۲. دانشکده فن‌آوری‌های نوین، دانشگاه صنایع و معادن ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۵۱۸، تهران - ایران

۳. دانشکده مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، صندوق پستی: ۱۶۳-۱۶۷۶۵، تهران - ایران

چکیده: کپسول‌های محتوی مواد پرتوزا به عنوان چشمه‌های براکی تراپی در درمان سرطان‌های پروستات، مغز و چشم از طریق کاشت در بدن کاربرد دارند. نشت‌ناپذیر کردن این لوله‌ها در حال حاضر به روش ذوب قسمتی از طول لوله (خود ذوبی لوله) از طریق جوشکاری (با تی‌آی‌جی)، پرتوهای لیزر و یا الکترون) انجام می‌شود. هدف این پژوهش نشت‌ناپذیر کردن لوله‌های مینیاتوری تیتانیومی به شکل کپسول حاوی مواد پرتوزا است. مقاله‌ی حاضر روش جدیدی بر مبنای ذوب را معرفی می‌کند. در این روش از یک قطعه تیتانیوم خالص تجاری درجه ۲ به شکل دیسک به عنوان لقمه استفاده می‌شود. لقمه در انتهای لوله به وسیله‌ی دستگاه جوشکاری (تی‌آی‌جی) در یک زمان کوتاه ذوب می‌شود. پس از ذوب کامل، لقمه به شکل یک قطره در دهانه‌ی لوله، با قسمت کوچکی از آن درآمیخته و با هم منجمد شده و لوله را مسدود می‌کند. خصوصیات فلزکاری و فرایند نشت‌ناپذیر کردن لوله‌ها به وسیله‌ی لقمه و روش تی‌آی‌جی در نواحی مختلف از جمله ناحیه‌ی حرارت دیده‌ی لوله، منطقه‌ی جوش و فصل مشترک اتصال قطره به لوله مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت نمونه‌های تهیه شده آزمایش‌های مربوط به استانداردهای ISO2919 و ISO9978 را با موفقیت پشت سر گذاشتند. نتایج به دست آمده، مطلوب و مناسب بودن روش لقمه - تی‌آی‌جی را تأیید نمود.

کلیدواژه‌ها: چشمه‌ی براکی تراپی، جوشکاری تی‌آی‌جی، کپسول تیتانیومی

Fabrication of Miniature Titanium Capsule for Brachytherapy Sources Using Tungsten Inert Gas (TIG) Method

R. Naghdi*^{1,2}, Sh. Sheibani¹, M. Tamizifar^{2,3}

1. Nuclear Science Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran

2. Iran University of Industries and Maene, P.O.Box: 14395-518, Tehran - Iran

3. Iran University Science and Technology, P.O.Box: 16765-163, Tehran - Iran

Abstract: The capsules containing radioactive materials as brachytherapy sources are used for implanting into some target organs for malignant disorders treatments, such as prostate, eyes, and brain cancers. The conventional method for sealing the tubes is to weld them using a laser beam which is now a part of tube melting methods (self welding). The purpose of this study was to seal miniature titanium tubes containing radioactive materials in the form of capsules. This study introduced a new method based on melting process. A piece of commercially pure titanium grade 2 in the form of disk was used for the experiment. The sample was melted at the top of the tube by a TIG welding device for a short time duration. After completion of the melting, the disk in the form of a drop was mixed with a small part of it and both were solidified and hence closed the tube. We evaluated the tubes for the metalurgical properties and seal process which took place by TIG in different zones, including the heat affected zone (HAZ), fusion zone (FZ), and interface (I) of the joint of the drop to the tube. Finally, the produced samples were tested according to the ISO2919 & ISO9978 and the results confirmed the Disk & TIG procedure.

Keywords: Brachytherapy Source, TIG Welding, Titanium Capsule

۱. مقدمه

امروزه روش‌های درمانی مختلفی برای سرطان به کار می‌رود. پرتودرمانی عمومی‌ترین روش درمان سرطان‌ها است و براکی‌تراپی شاخه‌ای از پرتودرمانی است که در آن ماده‌ی پرتوزا درون یا در مجاورت بافت سلول‌های سرطانی قرار گرفته و رشد آن را متوقف و یا خیلی کند می‌کند و در مواردی حتی می‌تواند بافت سرطانی را فشرده و کوچک کرده، یا آن را از بین ببرد [۱]. این روش به سرعت در حال توسعه است. ماده‌ی پرتوزا باید درون محفظه‌ای به نام کپسول قرار گیرد و کپسول باید زیست سازگار بوده و سیستم ایمنی بدن را تحریک نکند. علاوه بر این باید مانع نشت و تماس مستقیم ماده‌ی پرتوزا با بدن در طول مدت درمان باشد. تیتانیوم خالص سال‌ها است که به عنوان ماده‌ی کپسول با موفقیت استفاده می‌شود. این ماده به دلیل زیست سازگاری فوق‌العاده خوب، مقاومت زیاد در مقابل خوردگی و خواص مکانیکی خاص و قابلیت جوشکاری مناسب به خوبی می‌تواند به عنوان ماده‌ی مناسب کپسول مورد استفاده قرار گیرد [۳، ۴]. کپسول مدل ۶۷۰۲، یک لوله‌ی مسدود شده به طول تقریبی ۴/۵mm، به قطر ۰/۸mm و به ضخامت ۰/۰۵mm از جنس تیتانیوم خالص تجاری درجه ۲ است که ابتدا یک طرف آن به وسیله‌ی درپوشی از همان جنس لوله و یا آلیاژهای زیست سازگار تیتانیوم، که به روش مکانیکی ساخته شده است و قابلیت اتصال به لوله را دارد، و با استفاده از یکی از روش‌های اتصال مانند جوشکاری با پرتو لیزر^(۱) یا جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود غیرمصرفی تنگستن در اتمسفر گاز بی‌اثر^(۲) و یا روش‌های دیگر مسدود، و سپس ماده‌ی پرتوزا با فعالیت مشخص به کمک تکنیک‌های خاص در درون آن تعبیه می‌شود [۱]. طرف دوم لوله نیز با همان روش مسدود می‌شود، که در این صورت به آن چشمه‌ی بسته‌ی براکی‌تراپی می‌گویند [۵]. برای اطمینان از نشست‌ناپذیر بودن کپسول باید آزمایش عدم وجود نشتی مطابق استاندارد ISO ۹۹۷۸ انجام شود و هم‌چنین کپسول تهیه شده باید قادر باشد آزمایش‌های ISO ۲۹۱۹ را با موفقیت بگذراند. در این صورت چشمه‌ی بسته‌ی تهیه شده استانداردهای لازم برای کاشت در بدن را خواهد داشت [۶، ۷].

هدف این مقاله مسدود کردن دو دهانه‌ی لوله تیتانیومی و تهیه‌ی کپسول مطابق استانداردهای فوق‌الذکر به روش ذوب از طریق فرایند جوشکاری قوسی تنگستن در محیط گاز بی‌اثر بود. بررسی متالورژیکی و مکانیکی، و در نهایت آزمون نشت‌یابی نیز انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. مواد و تجهیزات

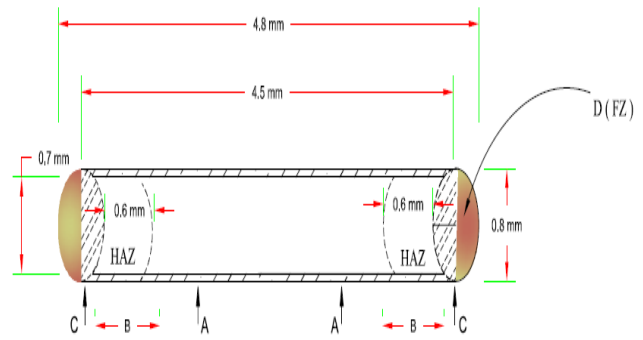
دستگاه جوشکاری تی‌آی‌جی با نام تجاری فرونیوس^(۳)، گاز بی‌اثر آرگون (درجه‌ی خلوص ۹۹/۹۹۹٪)، الکتروود تنگستن حاوی دو درصد توریم (WTh-2) به قطر ۰/۵mm، سیم تیتانیوم خالص تجاری تابکاری شده با خلوص ۹۹/۷ درصد و قطر ۰/۸۱ میلی‌متر (شرکت جانسون ماتی (آلفا‌اسار))^(۴) لوله‌ی بدون درز و از جنس تیتانیوم خالص تجاری درجه ۲ شرکت یونیفرم تیوب^(۵)، قالب مسی، رزین مانت^(۶) سرد اپو فلگس به همراه مایع سخت‌کننده اپو فلگس ساخت شرکت فونیکس مواد و تجهیزات استفاده شده در این مقاله‌اند.

۲.۲. ذوب لقمه به روش جوشکاری قوسی تنگستن در محیط گاز بی‌اثر (تی‌آی‌جی)

در این روش ابتدا لوله‌ی تیتانیومی در درون یک قالب مسی قرار می‌گیرد. قالب شامل دو نیم-دیسک است که در درون یک نگه‌دارنده قرار می‌گیرند و با هم یک دیسک با ضخامت حدود ۰/۳ میلی‌متر بیش‌تر از طول لوله تشکیل می‌دهند که دارای روزنه‌ای با سطح کاملاً صاف و صیقلی به قطر دقیقاً برابر قطر خارجی لوله‌ی تیتانیومی در مرکز است. طراحی نگه‌دارنده به شکلی است که قابلیت سرد کردن بیش‌تر قالب را دارد. بنابراین قالب وظیفه‌ی نگه‌داری لوله و کنترل سرعت انجماد در اتصال قطعه‌ی کار را دارد. یک دیسک به قطر برابر با قطر لوله و به ارتفاع نیم میلی‌متر به عنوان لقمه‌ی تیتانیومی در دهانه‌ی لوله قرار می‌گیرد. مقادیر ابعادی کپسول در شکل ۱ نشان داده شده است. سپس لقمه به وسیله‌ی قوس الکتریکی‌ای که در اتمسفر گاز بی‌اثر توانایی کافی برای ذوب لقمه‌ی تیتانیومی و اتصال آن به لوله‌ی تیتانیومی را دارد ذوب می‌شود. به محض ذوب شدن لقمه، جریان قوس الکتریکی قطع می‌شود اما جریان گاز بی‌اثر تا چند ثانیه پس از قطع جریان قوس الکتریکی ادامه می‌یابد. لقمه، ذوب شده و به صورت یک قطره‌ی مذاب متناسب با ضربات قوس و نیروی گرانش- تحت اثر این نیرو و فشار گاز بی‌اثر درون لوله‌ی تیتانیومی جریان می‌یابد و پس از مدت زمان کوتاهی منجمد می‌شود. تعداد ۳ نمونه (A۱، A۲، A۳) برای تجزیه و تحلیل و بازرسی محل اتصال انتخاب و مطابق استاندارد ASTM E۳-۰۱ آماده‌سازی شدند (شکل ۲). ارتباط بین مقدار اکسیژن گاز محافظ و رنگ منطقه‌ی جوش در جدول ۱ نشان



ناحیه‌ی حرارت دیده‌ی لوله و منطقه‌ی جوش دارای رنگ نقره‌ای بودند. این به معنی آن است که میزان جذب گاز اکسیژن در آنها کم‌تر از ۰٫۱۵٪ بوده است [۸]. در نتیجه نمونه‌های انتخابی در شرایط زیر جوشکاری شدند: جریان جوشکاری ۲A، دبی گاز ۱۲-۱۵lit/min، طول قوس ۰٫۷۵-۱mm، الکتروود تنگستن حاوی ۲٪ اکسید توریم و قطر ۰٫۵mm. لازم به ذکر است که جریان گازی اثر ۳ ثانیه قبل از جوشکاری، شروع و تا ۵ ثانیه بعد از جوشکاری ادامه داشت.



شکل ۱. مقطع کپسول جوشکاری شده به روش خودذوبی یا لقمه و تی‌آی‌جی.

۳.۲ روش بررسی و تجزیه و تحلیل منطقه‌ی اتصال

ابتدا بررسی چشمی منطقه‌ی جوش و منطقه‌ی حرارت دیده برای تعیین میزان اکسایش، به صورت ماکروسکوپی انجام شد. رنگ‌های اکسیدی بر روی منطقه‌ی جوش و جداری لوله بر اثر گرم شدن و جذب گازهای محیطی (اکسیژن، نیتروژن) در حین جوشکاری تشکیل می‌شود (جدول ۱). بررسی و تجزیه‌ی مناطق مختلف با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مستلزم آماده‌سازی نمونه‌ها بود. بعد از عمل مانت سرد بر روی نمونه‌ها، مقطع‌زنی نیز در همین مرحله از طریق سایش و با استفاده از سمباده انجام شد. سپس عمل سایش با استفاده از صیقل‌دهنده‌ی نمدی به همراه ساینده به انجام رسید. متعارف‌ترین ساینده‌ی مرحله‌ی پایانی شامل $0.3\mu\text{m}$ ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) و یا $0.5\mu\text{m}$ ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) است. ریزحکاری^(۷) نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM ۴۰۷-۹۹ و با محلول ظاهرکننده‌ی کروم برای مشاهده‌ی ریزساختار انجام شد.

۱.۳.۲ تصاویر SEM، تجزیه‌ی طیفی پرتو ایکس پاشنده‌ی انرژی^(۸) (EDS) و نقشه‌برداری با پرتو ایکس^(۹)

برای تعیین توزیع گازهای اکسیژن و نیتروژن، نقشه‌برداری از نمونه‌ها با پرتو ایکس، و بررسی توزیع ناخالصی‌های موجود در تیتانیم با خلوص تجاری از طریق تجزیه‌ی طیفی پرتو ایکس پاشنده‌ی انرژی (EDS) منطقه‌ی اتصال فلز جوش و لوله به انجام رسید. خطای این بررسی برای همه‌ی نمونه‌ها کم‌تر از ۶٪ بود. از تصاویر SEM هم برای نشان دادن عدم تخلخل مربوط به مقطع مورد بررسی (محل اتصال) استفاده شد.



شکل ۲. تصویر لوله‌ی مسدود شده به روش ذوب لقمه و تی‌آی‌جی.

جدول ۱. ارتباط بین مقدار اکسیژن گاز محافظ، رنگ و سختی اکسید

درصد اکسیژن	رنگ سطح جوش	سختی (ویکرز)
۰	نقره‌ای	242 ± 11
۰٫۱۵	قهوه‌ای	246 ± 16
۰٫۵	قهوه‌ای تیره	247 ± 13
۱٫۵	قهوه‌ای تیره‌ی ارغوانی	254 ± 20
۲	قهوه‌ای تیره‌ی ارغوانی / آبی	282 ± 18
۳	ارغوانی	295 ± 16
۵	آبی	323 ± 15
۱۰	آبی	373 ± 20

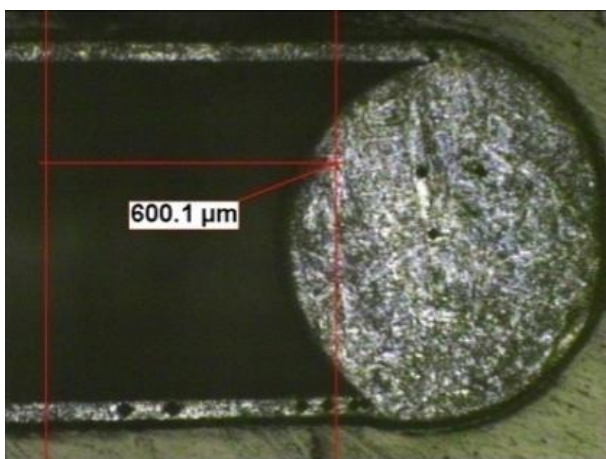
داده شده است و لازم به ذکر است که منطقه‌ی جوش با رنگ‌های متناظر با جذب اکسیژن بیش از ۲ درصد، از نظر استاندارد جوشکاری قابل قبول نیست. نمونه‌های انتخاب شده همگی در

۴.۲ کنترل کیفی

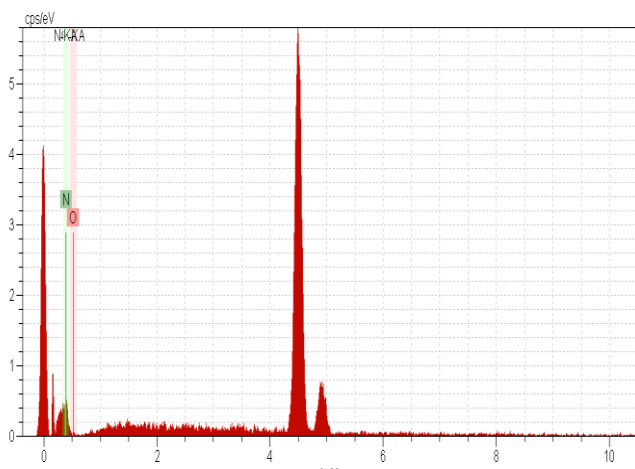
نیترژن را نشان می‌دهند که در آن نقاط قرمز مربوط به اکسیژن و نقاط سبز مربوط به نیترژن‌اند.

جدول ۲، مقادیر گازهای اکسیژن و نیترژن نمونه‌ها و همچنین ناخالصی‌های موجود در تیتانیوم با خلوص تجاری در نقطه‌ی اتصال فلز جوش به لوله‌ی تیتانیومی را نشان می‌دهد. مقایسه‌ی این مقادیر با مقادیر جدول ۱ حاکی از اتصال مطلوب از نظر استاندارد جوشکاری تیتانیوم است.

با استفاده از روش‌های حباب و غوطه‌ورسازی در مایع داغ تمامی نمونه‌ها مورد آزمون نشت‌یابی قرار گرفتند. نتایج حاکی از عدم مشاهده حباب بود و در آزمایش غوطه‌ورسازی در مایع داغ، مقدار مس کم‌تر از مقدار معادل ۱۸۵ بکرل مواد پرتوزا بود.



شکل ۳. اندازه‌ی منطقه‌ی حرارت دیده و مقطع جوش لقمه و تی‌آی‌جی (بزرگ‌نمایی ۵۰۰).



شکل ۴. طیف اکسیژن و نیترژن منطقه‌ی I، محل اتصال لقمه و لوله‌ی تیتانیومی نمونه‌ی A۲.

روش‌های کنترل چشمه‌ی پرتوزا و نشت‌یابی کپسول‌های تولید شده به ترتیب در استانداردهای ISO-۲۹۱۹ و ISO-۹۹۷۸، آورده شده است [۶، ۷]. آزمایش نشت‌یابی شامل آزمون‌های ذیل بود:

- آزمون حباب: در روش آزمون حباب، ابتدا چشمه‌ی بسته به مدت ۵ دقیقه به طور کامل در نیترژن مایع فرو برده شد. سپس برای جلوگیری از انتقال حرارت، به وسیله‌ی یک پنس نارسانا به داخل متانول منتقل و به منظور مشاهده‌ی خروج حباب گاز به مدت ۱ دقیقه، پایش چشمی انجام شد [۱].

- آزمون غوطه‌ورسازی (در مایع داغ): چشمه‌ی بسته در مایعی که هیچ‌گونه آسیبی به پوشش خارجی آن وارد نمی‌کند، فرو برده شد. از جمله‌ی چنین مایعاتی می‌توان به آب مقطر، محلول‌های پاک‌کننده‌ی ضعیف یا عوامل کی‌لیت‌ساز و نیز محلول‌های اسیدی یا قلیایی رقیق با غلظت حدود ۵٪ اشاره کرد. مایع تا دمای 50 ± 5 °C یا 323 ± 5 °K گرم شده و دست کم ۴ ساعت در همان دما نگه داشته شد. چشمه‌ی بسته از مایع خارج و پرتوزایی مایع اندازه‌گیری شد. تعداد هفت کپسول که در آن‌ها یک سیم مسی به طول ۳ میلی‌متر و قطر ۰/۵ میلی‌متر جای‌گزین ماده‌ی پرتوزا شده بود، برای این آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. میزان نشت مس به درون مایع داغ با استفاده از تکنیک تجزیه‌ی پلاسمای جفت شده‌ی القایی (ICP) و مقایسه‌ی آن با نمونه‌های مرجع (تعداد ۳ عدد کپسول فاقد سیم مسی و در نتیجه فاقد نشت مس به درون مایع داغ) اندازه‌گیری شد که از مقدار ماده‌ی پرتوزای معادل ۱۸۵ بکرل کم‌تر بود [۵، ۶].

۳. یافته‌ها

شکل ۳ تصویری از مقطع جوش و عرض نوار منطقه‌ی حرارت دیده را که در هر سه نمونه حدود $600 \mu\text{m}$ تعیین شد، نشان می‌دهد. در شکل ۴ طیف اکسیژن و نیترژن محل اتصال لقمه و لوله‌ی تیتانیومی نشان داده شده است. ریزنگار الکترونی شکل (۵-الف) حاکی از عدم تخلخل مقطع نمونه‌ی A۲ است، و در شکل (۵-ب) نقاط رنگی توزیع یکنواخت گازهای اکسیژن و



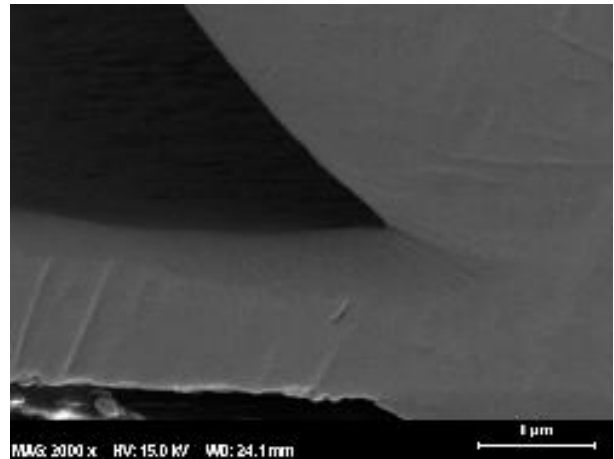
طریق جوشکاری و اتصال درپوش از طریق جوشکاری با لیزر را دارا است و از مزیت عدم نیاز به ساخت درپوش، هم‌جنس بودن لقمه و لوله، کاهش هزینه و مراحل تولید، برخوردار است. نتایج آزمون نشت‌یابی کپسول‌های تهیه شده به روش ذوب لقمه از طریق جوشکاری قوسی تنگستن در محیط گاز بی‌اثر طبق معیار استاندارد ISO ۹۹۷۸، حاکی از عدم نشت (کم‌تر از مقدار معادل ۱۸۵ بکرل مواد پرتوزا) بود.

تشکر و قدردانی

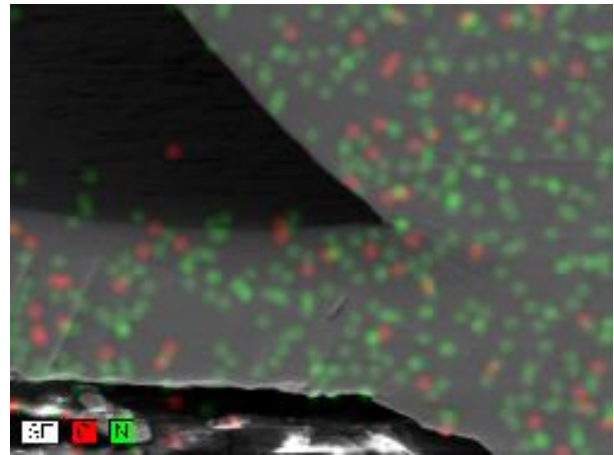
بدین وسیله بر خود لازم می‌دانیم از آقایان دکتر حسین پوریگی و مهندس مجتبی سنگ که در این کار ما را یاری کرده‌اند، صمیمانه تشکر کنیم.

پی‌نوشت‌ها:

۱. Laser Beam Welding (LBW)
۲. Gas Tungsten Arc Welding (GTAW/TIG)
۳. Fronius
۴. Johanson Matthey Company (Alfa Aesar)
۵. Uniform Tube Inc
۶. Mount
۷. MicroEtching
۸. EDS: Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy
۹. X-Ray Mapping



(الف)



(ب)

شکل ۵. (الف) ریزنگار الکترونی مربوط به نمونه‌ی A۲، (ب) طیف پرتو ایکس پاشنده‌ی انرژی (EDS).

جدول ۲. مقادیر عناصر برحسب درصد وزنی در نقطه‌ی اتصال، و تجزیه‌ی طیفی پرتو ایکس پاشنده‌ی انرژی (EDS) منطقه‌ی (I) محل اتصال فلز جوش و لوله‌ی تیتانیومی

کد نمونه	C (%)	N (%)	O (%)	Al (%)	V (%)	Cu (%)	Ti (%)	مجموع (%)
A۱	۳٫۷۱	۵٫۴۴	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۱۳	۰٫۹۲	۸۹٫۷۸	۱۰۰
A۲	۴٫۶۰	۵٫۷۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۶۷	۰٫۰۱	۸۸٫۹۰	۱۰۰
A۳	۹٫۷۲	۶٫۲۶	۰٫۰۲	۰٫۳۹	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۸۳٫۵۹	۱۰۰

۴. بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر روش جدیدی از نشت‌ناپذیر کردن لوله‌های مینیاتوری تیتانیومی بر مبنای ذوب را معرفی می‌کند. این روش، ذوب لقمه به وسیله جوشکاری قوسی تنگستن در محیط گاز بی‌اثر می‌باشد. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که روش لقمه و ذوب قابلیت جای‌گزینی روش‌های متعارف خود ذوبی لوله به



1. International Atomic Energy Agency, Production techniques and quality control of sealed radioactive sources of palladium-103, Iodine-125, Iridium-192 and Ytterbium-169, Final Report of a Coordinated Research Project, IAEA-TECDOC-1512 (2001-2005).
2. L. Keun, H. Hyon-Soo, S. Kwang-Jae, H. Soon-Bog, Optimization of Nd: YAG laser welding parameters for sealing small titanium tube ends Hyong, Materials Science and Engineering A415 (2006) 149-155.
3. A.R. Hruska and P. Borelli, Quality criteria for pure titanium casting, Laboratory soldering, and a device to aid in making uncontaminated castings, J. Prosthet. Dent. 66, 4 (1991) 561-565.
4. I. Watanabe, J.H. Watkins, H. Nakajima, M. Atsuta, T. Okabe, Effect of pressure difference on the quality of titanium casting, J. DENT. RES, 76 (1997) 773.
5. International Organization for Standardization, Sealed radioactive sources-general, ISO1677 (1977).
6. International Organization for Standardization, Radiation protection-sealed radioactive sources general requirement and classification, ISO 2919 (1999).
7. International Organization for Standardization, Radiation protection-sealed radioactive sources leakage test methods, ISO 9978 (1992).
8. X. Li, J. Xie, Effects of oxygen contamination in the Argon shielding gas in the laser welding of commercially pure titanium, Materiale Science, 40 (2005) 3437-3443.