فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۷، شماره‌ی ۱، بهار ۱۳۹۷

ایجاد اتصال سرامیک به فلز در ساخت پوسته تفنگ الکترونی لامپ‌های موج رونده (TWT)

محسن برزگر، احمدرضا محمد

شرکت گسترش کاربرد باریکه الکترون

* m.82.63.bh@gmail.com

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۳ اردیبهشت ۱۳۹۷

پذیرش: ۶ تیر ۱۳۹۷

کلید واژه:

تفنگ الکترونی، لامپ‌های موج رونده، اتصال سرامیک به فلز، آب‌بندی خلاء، استحکام چسبندگی

چکیده:

هدف از این تحقیق، ساخت پوسته تفنگ الکترونی لامپ‌های موج رونده حاوی اتصالات سرامیک به فلز است. با توجه به هزینه بالای ساخت چنین قطعات اب بند به خلاء، کوچکترین اشتباه در این مسیر موجب از بین رفتن انرژی و هزینه زیادی خواهد گشت، بنابراین در ابتدا نمونه‌هایی آزمایشی طبق استاندارد ASTM F19 برای بررسی شرایط اتصال‌دهی و رسیدن به خواص استحکامی و آب بند بودن به خلاء به کمک روش قالب گیری تزریقی ساخته شدند و تحت عملیات متالایزینگ و پخت در دماهای ۱۵۰۰ و ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۰ دقیقه قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمون‌های کشش و نشت‌یابی نشان داد که در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد، اتصال به طور مناسبی برقرار گردیده است، به طوریکه استحکام چسبندگی اتصالات برابر ۶۶ مگاپاسکال و میزان نشتی آنها به کمتر از 10^{-12}> میلی بار لیتر بر ثانیه رسید. پس از حصول این نتایج، عملیات مورد نظر بر روی قطعات اصلی پوسته تفنگ الکترونی به طور موفقیت آمیزی انجام گردید.

۱- مقدمه

لامپ موج رونده[1]، یک نوع خاص از لامپ‌های خلاء می‌باشد که در سیستم‌های مخابراتی برای تقویت کردن سیگنال‌های فرکانس رادیویی در محدوده مایکروویو مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱]. قسمت اصلی این لامپ، تفنگ الکترونی آن است که در انتهای لامپ قرار دارد و وظیفه اصلی آن تولید پرتوهای الکترونی و ساطع کردن آنها است. این قطعه متشکل از چندین جزء است که یکی از این اجزاء، بدنه آن می‌باشد که حاوی اتصالات سرامیک به فلز است[۲].

اتصالات سرامیک به فلز آب بند به خلاء، عمدتاً برای انتقال سیگنال‌ها، ولتاژهای بالا، جریان‌های زیاد، گازها و سیالات از بیرون یک محفظه آب بند به خلاء به درون آن استفاده می‌شوند. این نوع اتصالات در تجهیزاتی از جمله

[1] Traveling-wave tube

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.1.6.0]

دستگاه‌های طیف سنج جرمی، میکروسکوپ‌های الکترونی، شتاب دهنده‌های ذرات، لامپ‌های توان بالا، لیزرهای توان بالا و ... به عنوان جزء حیاتی از آنها هستند که در صورت خراب شدن آنها، دستگاه قابلیت استفاده نخواهد داشت. این اتصالات به گونه‌ای طراحی می‌شوند که بتوانند شرایط عایق الکتریکی و استحکام مکانیکی بالایی را فراهم کنند و بالاترین میزان خلاء را در شرایط دماهای بالا و دماهای زیر صفر درجه حفظ کنند[۴و۳].

به طور کلی روش‌های اتصال سرامیک‌ها به فلزات را می‌توان به دو دسته مکانیکی و شیمیایی تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های شیمیایی، اتصالات توسط تماس نزدیک اتمی در سطح تماس بین اجزای اتصال ایجاد شده و به دو دسته اتصال حالت جامد و اتصال حالت مذاب تقسیم‌بندی می‌شوند. از این میان فرآیند سینترینگ پودرهای فلزی یا فرآیند مولی- منگنز، به عنوان زیر مجموعه‌ای از اتصال حالت مذاب، یکی از بهترین و پر کاربردترین روش‌های اتصال سرامیک‌های آلومینایی به فلز برای کاربردهای آب بند به خلاء می‌باشند. زیرا که تغییرات جزئی در متغیرهای فرآیند اثر چندانی روی کیفیت اتصالات ندارد[۷و۶و۵]. این فرآیند، لحیم‌کاری سخت سرامیک به فلز را امکان پذیر می‌نماید.

در این روش در لایه متالیزه عمدتاً از فلزات دیرگداز که دارای ضریب انبساط حرارتی پایینی می‌باشند، استفاده می‌شود، به طوری‌که ابتدا سطح سرامیک به کمک رنگ‌های حاوی پودرهای فلزی مولیبدن و منگنز پوشش‌دهی و در ادامه به کمک آلیاژهای پرکننده فلزی، به همدیگر بریز می‌شوند[۶و۵]. در این فرایند اتصال‌دهی در صورت عدم ایجاد اتصال مناسب پوشش مولیبدنی به سرامیک، علاوه بر به هدر رفتن زمان زیاد، هزینه‌های بالایی نیز بابت ساخت قطعات سرامیکی و فلزی از دست خواهد رفت.

برای رسیدن به چسبندگی مطلوب، باید پارامترهای زیادی کنترل شود که یکی از مهمترین آنها انتخاب دمای مناسب برای عملیات سینترینگ پوشش متالایز است[۹و۸و۷]. محققان بیان کرده‌اند که دمای سینترینگ باید به گونه‌ای باشد که حداقل ۲۰۰ درجه بالاتر از دمای یوتکتیک و حداکثر ۳۰۰ درجه پایین‌تر از دمای دفورمه شدن نمونه‌های سرامیکی باشد، به طوری‌که دمای مناسب برای عملیات زینتر پودرهای متالایز ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد گزارش شده است و در صورت انتخاب صحیح پارامترها، استحکام اتصالات سرامیک به فلز باید بیشتر از ۵۰ مگاپاسکال گردد[۱۰و۷و۵]. همچنین با انتخاب دمای مناسب می‌توان از صرف انرژی‌های اضافی مربوط به افزایش دما و زمان زینتر، جلوگیر کرد که از لحاظ صنعتی یک پارامتر مهم در تولید به حساب می‌آید.

بنابراین هدف از این تحقیق، انتخاب دمای مناسب برای ایجاد اتصال سرامیک به فلز و اجرای مناسب فرآیند اتصال‌دهی برای ساخت پوسته تفنگ الکترونی لامپ‌های موج رونده است که حاوی چندین اتصال سرامیک به فلز می‌باشند.

۲- فعالیت‌های تجربی

در این تحقیق، ابتدا، برای بررسی اتصال سرامیک به فلز، از سرامیکی با ترکیب شیمیایی ۹۴ درصد آلومینا و فلزی

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.1.6.0]

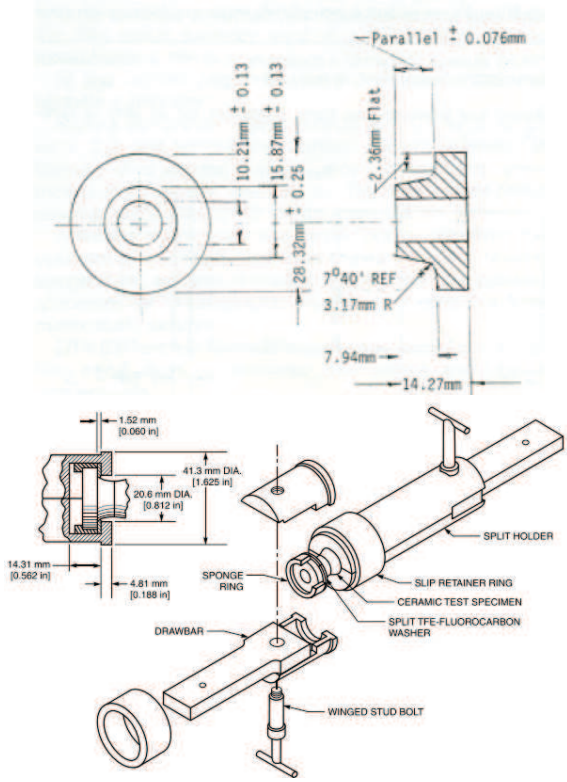
از جنس آلیاژ آهن- نیکل-کبالت با نام تجاری کوار استفاده گردید. برای ساخت خمیر متالایز، ابتدا پودرهای مولیبدن و منگنز به نسبت ۸۰ به ۲۰ با همدیگر مخلوط و بعد از آن به محلولی شامل استون و لاک نیتروسلولوز اضافه شدند و به مدت ۱۵ ساعت، تحت عملیات مخلوط سازی (به منظور هموژن سازی پودر با مواد آلی) قرار گرفتند[۵]. ترکیب شیمیایی خمیر متالایز در جدول ۱ نشان داده شده است.

در این راستا برای بررسی اولیه خواص استحکامی و ریزساختاری اتصالات، نمونه‌های سرامیکی و فلزی و نگهدارنده‌های آنها در حین آزمون کشش طبق استاندارد ASTM F19 و AWS C3.2M [۱۲و۱۱] آماده شدند (شکل ۱) و سپس به وسیله یک قلمو، خمیر متالایز بر روی سطح مقطع مورد نظر سرامیک برای اتصال اعمال شد. این نمونه‌ها، تحت اتمسفر هیدروژن با دیوپوینت بالاتر از ۲۰ درجه سانتیگراد و در دماهای ۱۵۰۰ و ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت زمان ۴۰ دقیقه پخت شدند. بعد از آن بر روی سطح متالایز شده نمونه‌ها، یک لایه نیکل با ضخامت۱۰ تا ۱۵ میکرون، به روش آبکاری الکتریکی، پوشش‌دهی شد. این پوشش‌ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد تحت اتمسفر هیدروژن خشک، با دیوپوینت کمتر از ۲۰- درجه سانتیگراد، آنیل شدند.

بعد از عملیات آبکاری و آنیل، عملیات اتصال‌دهی به روش لحیم‌کاری سخت و با استفاده از آلیاژ پرکننده پایه نقره (Ag-28Cu) انجام شد. برای بررسی میزان نشتی اتصالات از دستگاه نشتی‌یاب مدل Leybold 1300 -I و برای بررسی میزان استحکام اتصال از دستگاه کشش مدل SANTAM STM-250 استفاده شد. همچنین جهت مشاهده ریزساختارها از میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی مدل ISI ABT SR-50 و مدل TESCAN //VEGA مجهز به آنالیزگر EDS بهره گرفته شد. بعد از بررسی نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده بر روی نمونه‌های آزمایشی کشش، عملیات فوق بر روی نمونه‌های اصلی انجام شد. نقشه و قطعات آماده شده برای ساخت تفنگ الکترونی در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی خمیر متالایز (٪).

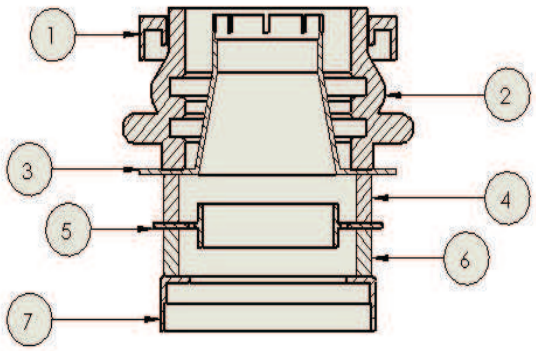
Mn	Mo	acetone	methyl ethyl ketone	nitrocellulose lacquer
۱۴	۵۵	۱۳	۶	۱۲



شکل ۱- نقشه نمونه‌های سرامیکی و فلزی مورد نیاز برای آزمون کشش به همراه نگهدارنده آنها.

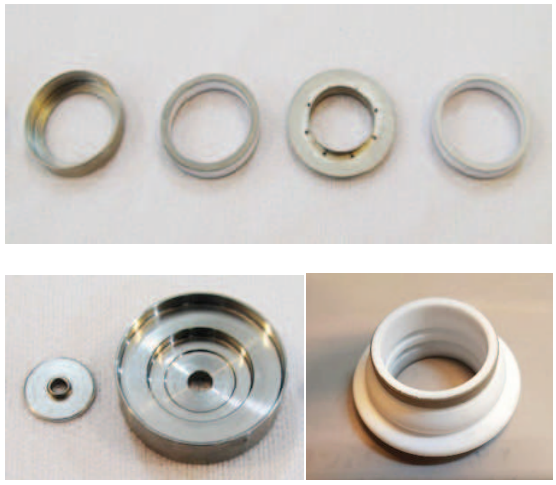
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.1.6.0]



شماره	نام قطعه	جنس قطعه
۱	رابط اتصال تفنگ الکترونی به آند	کوار
۲	سرامیک اصلی	سرامیک
۳	پوسته متمرکز کننده	کوار
۴	رینگ سرامیکی ۱	سرامیک
۵	مقر کاتد	کوار
۶	رینگ سرامیکی ۲	سرایک
۷	اتصال خارجی رشته گرمساز	کوار

شکل ۲- نقشه پوسته تفنگ الکترونی



شکل ۳- قطعات ساخته شده برای تولید پوسته تفنگ الکترونی

۳- نتایج و بحث

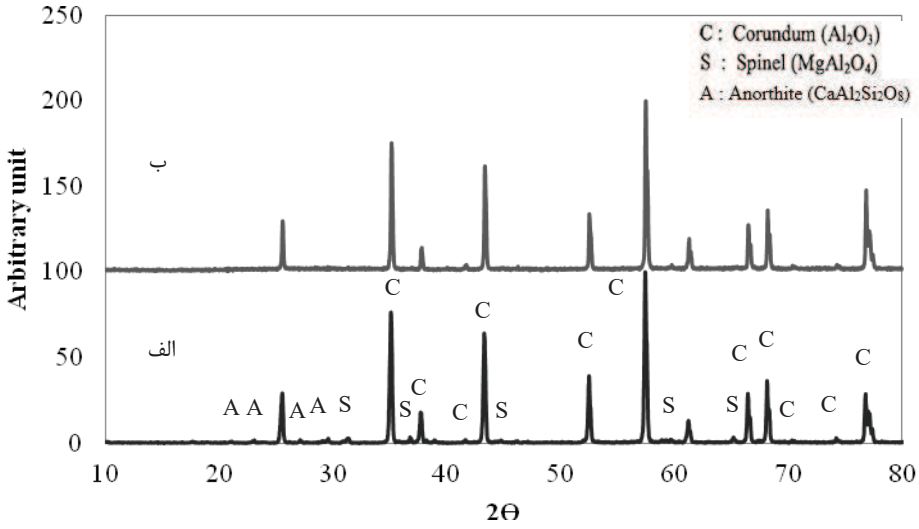
در شکل ۴، آنالیز پراکنش اشعه ایکس از سرامیک ساخته شده قبل و بعد از عملیات پخت پوشش متالایز نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های سرامیکی حاوی فازهای کریستالی آنورتیت و اسپینل می‌باشند. محققان بیان کرده‌اند که در صورت حضور فاز آنورتیت در ساختار و عدم حذف شدن آن، در حین سرد شدن این فاز کریستالی رشد کرده و باعث ایجاد ترک در فصل مشترک اتصال لایه متالایز با سرامیک می‌شود[۸]. با بررسی دو دمای ۱۵۰۰ و ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد، مشخص شد که در دمای متالایز ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد، بعد از سرد شدن تحت سرعت ۱۰۰ درجه بر دقیقه تا دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد، هیچ پیک آنورتیتی تشخیص داده نشده است، اما در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد این فازها بعد ازعملیات متالایزینگ، در ساختار حضور دارند.

نمایی از نمونه‌های متالایز شده و بریز شده در شکل ۵ نشان داده شده است که طبق استاندارد ASTM F19 (شکل ۱) ساخته شده‌اند. همچنین در شکل ۶، تصویری از آزمون کشش با استفاده از نگهدارنده‌های مورد نیاز برای قرارگیری نمونه‌های کشش در فک دستگاه، قابل مشاهده است. نتایج حاصل از آزمون کشش (جدول ۲) نشان داد که میزان استحکام اتصال پوشش حاصل در دمای۱۵۰۰ درجه سانتیگراد برابر ۲۲ مگاپاسکال و در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد برابر ۶۶ مگاپاسکال گردیده است. استحکام مناسب برای قابلیت کاربرد اتصالات سرامیک به فلز در تجهیزات خلاء باید از ۵۰ مگاپاسکال بیشتر باشد. [۷].که تنها دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد، موجب ایجاد استحکام مطلوب شده است. علاوه بر این آزمون نشت یابی نیز نشان

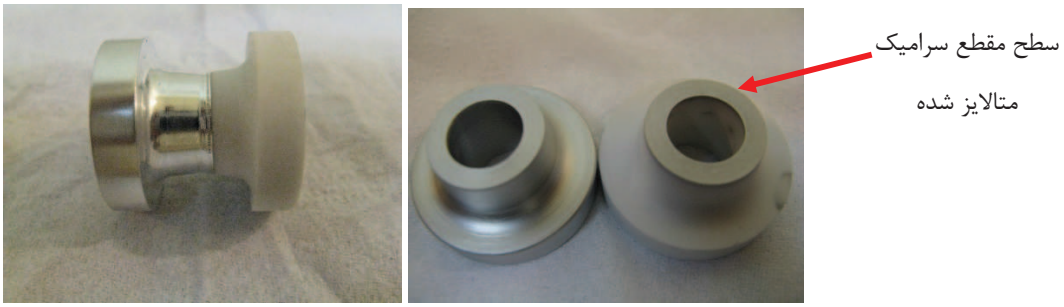
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.1.6.0]

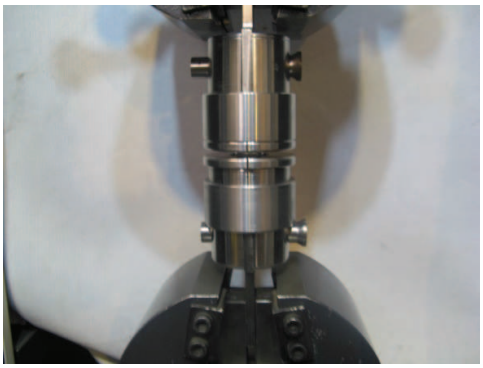
می‌دهد که سرعت نشتی بعد از فرآیند متالایزینگ در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد به کمترین میزان ممکن ($<10^{-12}$ میلی بار لیتر بر ثانیه) برای کاربردهای آب بند خلاء رسیده است (شکل ۷).



شکل ۴- پراکنش اشعه ایکس از نمونه الف) قبل از فرآیند متالایزینگ و بعد از فرآیند متالایزینگ با سرعت سرد شدن ۱۰۰ درجه بر دقیقه از دمای ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد ب) بعد از فرآیند متالایزینگ با سرعت سرد شدن ۱۰۰ درجه بر دقیقه از دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد.



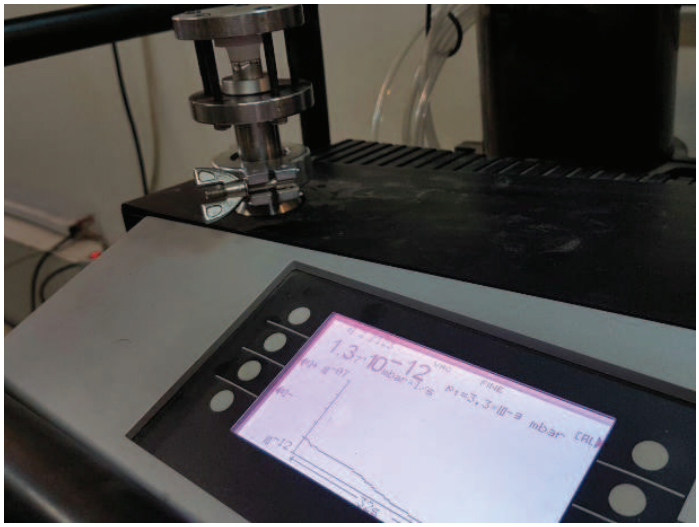
شکل ۵- نمونه استاندارد برای بررسی میزان استحکام چسبندگی لایه متالایز.



شکل ۶- آزمایش کشش برای نمونه‌های اتصال دهی شده در شکل ۴.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.1.6.0]



شکل ۷- آزمون نشت یابی برای نمونه‌های اتصال‌دهی شده در شکل ۴.

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون کشش و نشت یابی محل‌های اتصال.

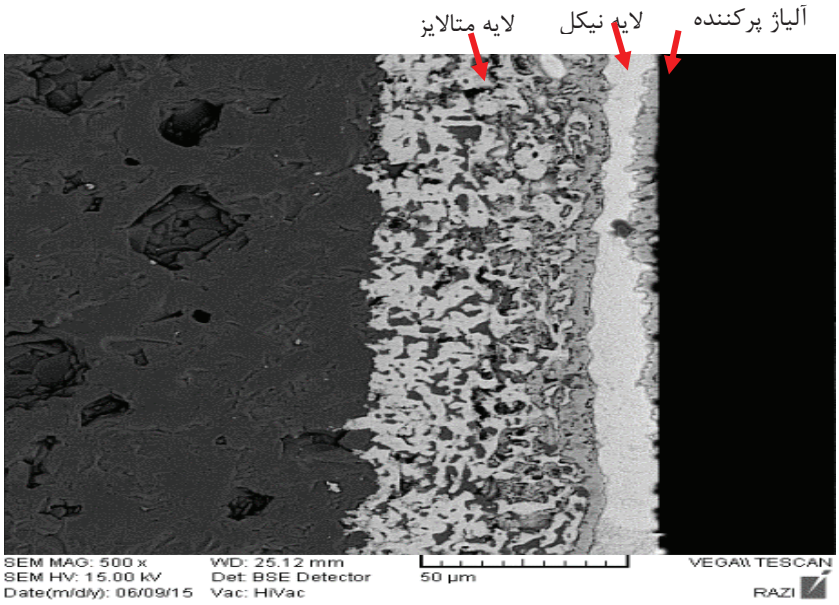
دمای متالایز (°C)	استحکام کششی (Mpa)	نرخ نشتی (Mbarlit/S)
۱۵۰۰	۲۲	$<۱۰^{-۴}$
۱۶۰۰	۶۶	$<۱۰^{-۱۲}$

نتایج بررسی‌های ریزساختاری فصل مشترک اتصال قطعات به کمک میکروسکوپ الکترونی، در شکل ۸ نشان داده است. در شکل ۹ نیز، نتایج آنالیز خطی از فصل مشترک اتصال سرامیک به فلزتحت دمای متالایز ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد ، نشان داده شده است. با توجه به نتایج آنالیز خطی مشاهده می‌شود که فاز شیشه به طور مناسب به درون لایه مولیبدن نفوذ کرده است، به طوری‌که هیچگونه نفوذی از آلیاژ پرکننده به درون لایه متالایز و رسیدن به سطح اتصال تشخیص داده نشد. این نتایج ریزساختاری به نوبه خود، نتایج حاصل از آزمون کشش و نشت یابی را تایید می‌کند، به طوریکه در اثر عدم نفوذ فاز شیشه به داخل لایه مولیبدن و نفوذ آلیاژ پرکننده به درون آن، لایه متالایز دچار نشتی شده و به استحکام مطلوب دست نمی‌یافت [۱۴و۱۳]. این درحالی است که تحت دمای متالایز ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد، در حین آزمون کشش لایه متالایز به راحتی از سطح سرامیک جدا شد (شکل۱۰).

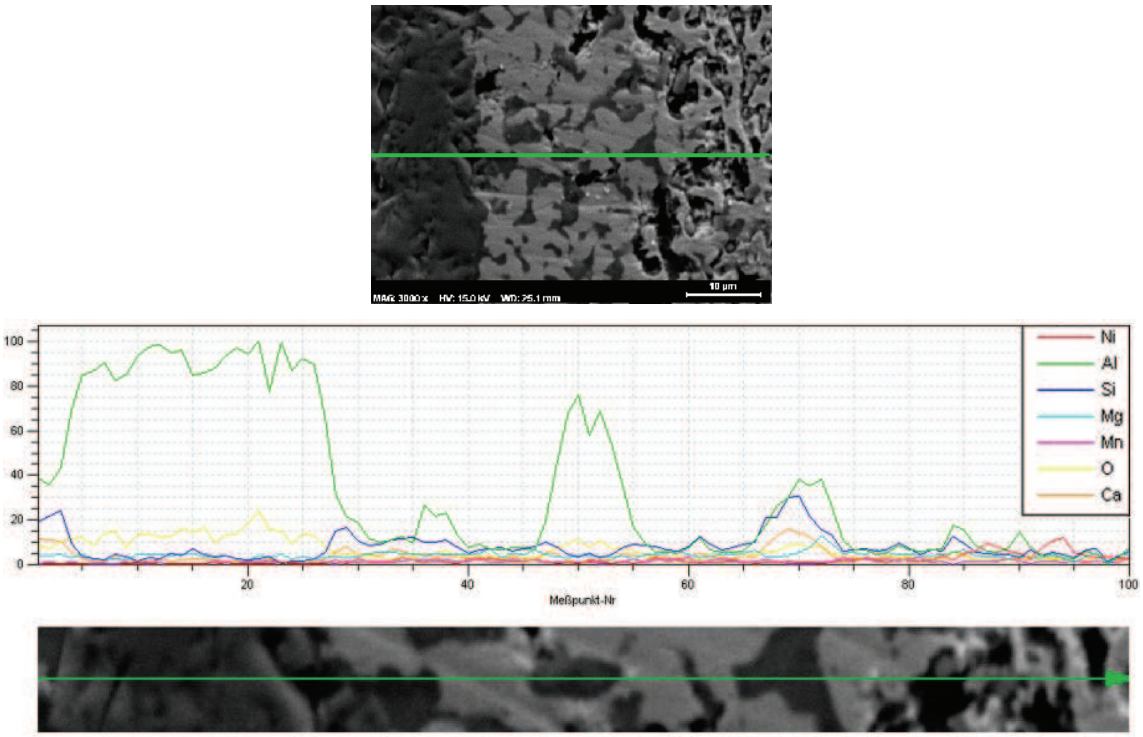
بعد از دست یابی به نتایج مطلوب اتصال‌دهی سرامیک به فلز، عملیات اتصال‌دهی برای ساخت پوسته تفنگ الکترونی به طور موفقیت آمیزی انجام شد. شکل ۱۰، تصویری از پوسته تفنگ الکترونی بعد از عملیات اتصال‌دهی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.1.6.0]



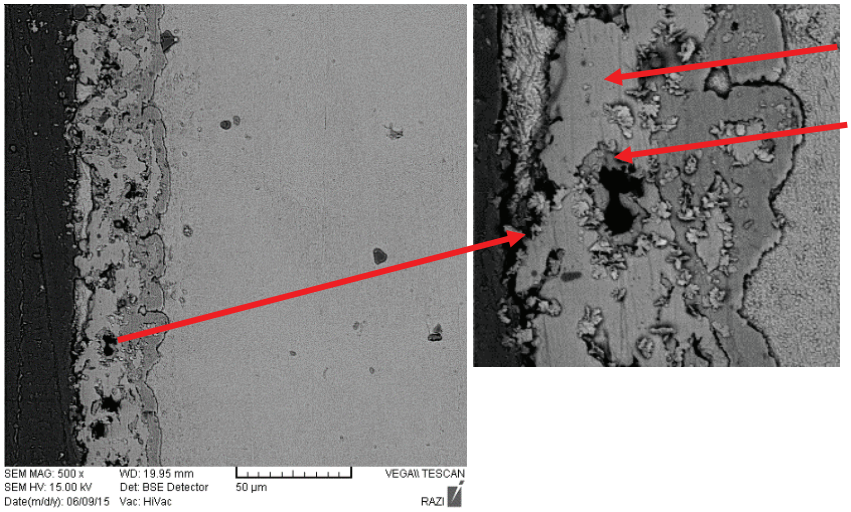
شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک اتصال نمونه‌های کشش، متالایز شده در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد.



شکل ۹- آنالیز خطی از لایه متالایز پوشش داده شده بر روی سرامیک تحت دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.1.6.0]



شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک اتصال نمونه‌های کشش، متالایز شده تحت دمای ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد.

شکل ۱۱- پوسته تفنگ الکترونی بعد از عملیات بریزینگ.

۴- نتیجه‌گیری

- با انتخاب دمای مناسب برای پخت پوشش‌های متالایز (مولیبدن) بر روی سرامیک آلومینایی ۹۴ درصد، می‌توان فازهای کریستالی نامناسب برای استحکام‌دهی را حذف کرد، به طوری‌که فاز آنورتیت به عنوان فازی نامطلوب برای چسبندگی پوشش متالایز، در دمای پخت ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد حذف گردید و استحکام اتصال افزایش یافت.
- نتایج حاصل از آزمون کشش نشان می‌دهد که با افزایش دمای متالایز از ۱۵۰۰ به ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد، استحکام چسبندگی اتصال از ۲۲ به ۶۶ مگاپاسکال بهبود یافته است. این درحالی است که با افزایش استحکام، سرعت نشتی نیز به سرعت کاهش یافته است.
- با استفاده از روش اتصال سرامیک به فلز، پوسته تفنگ الکترونی لامپ موج رونده به طور موفقیت آمیزی ساخته شد. با توجه به این دست یافت، می‌توان پوسته‌های تفنگ الکترونی برای دستگاه‌های دیگری مانند شتابدهنده‌ها و جوشکاری تحت خلاء را نیز فراهم کرد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.1.6.0]

مراجع

[1] Luiz, Robert. "A Comprehensive Review of Travelling-Wave Tube Technology", DEFENCE RESEARCH ESTABLISHMENT OTTAWA , No. DREO-TN-80-1, 1979.

[2] https://www.britannica.com/technology/electron-gun

[3] AG. Pincus, "Metallographic Examination of Ceramic-Metal Seals", Journal of the American Ceramic Society, Vol. 36, pp. 152-8, 1953.

[4] A. Roth, "Vacuum sealing techniques. Springer Science & Business Media" ,pp. 201-210,1994.

[5] WH. Kohl, "Handbook of materials and techniques for vacuum devices", 1967.

[6] F. Rosebury, "Handbook of electron tube and vacuum techniques", pp. 54-75,1956.

[7] J. T. Klomp, "Joining of Ceramic–Metal Systems: Procedures and Microstructures", In Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials", Oxford, pp. 263-271, 1991.

[8] ME. Twentyman, P. Popper, "High-temperature metallizing". Journal of Materials Science".Vol. 10, pp. 777-90, 1975.

[9] I. Foroutan, R. S. Mamoory, N. Ranjbar, "Investigating effect of temperature and time of metalised layer sintering by SMPP method on tensile strength and thermal shock resistance", Materials Science and Technology, Vol. 26, pp.487-492, 2010.

[10] Y. Zhang, XC. Chen, "Progress in joining ceramics to metals". Journal of iron and steel research, international,Vol. 13, pp. 1-5, 2006.

[11] ASTM F19 – 11, "Standard Test Method for Tension and Vacuum Testing Metallized Ceramic Seals", 2016.

[12] AWS C3.2M/C3.2:2008, "Standard Methods for Evaluating the Strength of Brazed Joints", 2008.

[13] Z. Ju-xian, "Microstructure of Metallized Alumina Ceramics Applied in Vacuum Electronics Comp onents of Domestic and Oversea", Vacuum Electronics, Vol. 4, pp. 1-6, 2003.

[14] JX. ZHANG, L.Q GAO, "Study on Sintering Mechanism of the Metallized Layers of 95% Al2O3 Ceramic in Mo-Mn Process", Vacuum Electronics,Vol. 4, pp.1-3, 2007.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.1.6.0]