



اصلاح سطح آلیاژ آلومیناید تیتانیم گاما به روش نیتروژن دهی پلاسمایی با کاتد کمکی

عرفان عباسی^۱، سید رحمان حسینی^۲، مهدی احمدی^۳

۱. دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان (دانشجوی کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد)

۲. دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان (استادیار)

۳. دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان (دانشجوی دکتری مهندسی مواد)

چکیده

هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیرات فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی با استفاده از کاتد کمکی بر ترکیب شیمیایی، ریزساختار و سختی سطح آلیاژ آلومیناید تیتانیم گاما است. استفاده از کاتد کمکی که نوعی از فرایند کاتد توخالی است، منجر به افزایش چگالی یونی و یکنواختی توزیع پلاسمای می شود. فرایند نیتروژن دهی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد، زمان های ۳، ۶ و ۹ ساعت و نسبت گاز $N_2/H_2=1$ انجام شد. آزمون های مشخصه یابی با استفاده از XRD، EDS، FESEM و ریزسختی سنج انجام شدند. نتایج آزمون تفرق سنجی اشعه ایکس، تشکیل فازهای نیتریدی TiN و Ti_2AlN را تأیید می کند. به علت تمایل بالاتر تیتانیم به جذب نیتروژن نسبت به آلومینیم، فاز TiN در لایه های بالایی و فاز Ti_2AlN در زیر آن تشکیل شده است. نتایج آزمون های سختی سنجی، ایجاد لایه های یکنواخت نیتریدی با سختی در حدود ۴ برابر سختی زیرلایه را نشان می دهد. استفاده از کاتد کمکی در فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی آلیاژ آلومیناید تیتانیم، ضمن افزایش یکنواختی لایه های نیتریدی، منجر به کاهش ۷۰ درصدی زمان عملیات نیتروژن دهی متداول می شود.

واژه های کلیدی: آلومیناید تیتانیم گاما؛ نیتروژن دهی پلاسمایی؛ کاتد کمکی؛ اصلاح سطح.

مقدمه

محلول‌های جامد و ترکیبات بین‌فلزی نظیر آلومینایدها دسته‌ای از مواد پیشرفته هستند که تلفیقی از خواص فلزی و سرامیکی را دارا هستند. گروه آلومینایدهای تیتانیومی از جمله محلول‌های جامد بین‌فلزی هستند که جهت ارتقاء خواص خوردگی و مکانیکی در دماهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این گروه، آلومیناید تیتانیم گاما با حدود ۵۰ درصد اتمی آلومینیم، کاربرد فراوان‌تری در صنایع هوافضایی دارد [۱]. آلیاژهای آلومیناید تیتانیم گاما به دلیل نسبت استحکام تسلیم به چگالی و دمای ذوب بالا، مقاومت به خوردگی، اکسایش و خواص مکانیکی مناسب تا حدود دمای 600°C ، جایگزین مناسبی برای ابرآلیاژهای پایه‌نیکل در ساخت اجزای موتورهای جت هستند [۲]. با وجود خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب، آلومینایدهای تیتانیم همانند دیگر آلیاژهای تیتانیومی دارای خواص تریبولوژیکی ضعیفی هستند که توجه به موضوع اصلاح رفتار تریبولوژیکی آن‌ها را ضروری می‌سازد [۳].

فرایندهای پوشش‌دهی و اصلاح سطح مختلفی جهت ارتقاء خواص سایشی مواد وجود دارند که اکثریت آن‌ها برای آلیاژهای تیتانیومی قابل استفاده هستند. از جمله شناخته‌شده‌ترین این روش‌ها می‌توان به فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی اشاره نمود. در این فرایند که از تخلیه تابناک الکتریکی در ولتاژ بالا و در محیط خلأ حاصل می‌شود، جهت ایجاد نیتروژن اتمی فعال و نفوذ آن به داخل قطعه استفاده می‌شود. طی این عملیات، نیتروژن به داخل سطح آلومیناید تیتانیم نفوذ می‌کند و با تشکیل لایه سخت نیتریدی^۱ در سطح و نیز ناحیه‌ای با تغییر تدریجی نیتروژن^۲، سختی و مقاومت به سایش سطح را افزایش می‌دهد [۴]. در این فرایند، میزان افزایش سختی سطح به دما، زمان، ترکیب گاز و نیز روش انجام نیتروژن‌دهی پلاسمایی بستگی دارد.

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که در دو دهه اخیر، پوشش‌دهی آلیاژهای آلومیناید تیتانیم گاما مورد توجه پژوهش‌گران بوده است [۵-۹]؛ با این وجود گزارشات محدودی در زمینه اصلاح سطح آلیاژهای آلومیناید تیتانیم با استفاده از فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی وجود دارد [۱۰-۱۲]. در این تحقیقات که عمدتاً از فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی متداول استفاده شده است، تأثیر متغیرهای دما، زمان، نسبت گازها و فشار کاری بر خواص سطحی آلومینایدهای تیتانیم مورد بررسی قرار گرفته است. همه نتایج تحقیقات گذشته بر انجام فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای حدود 800°C درجه سانتی‌گراد و در زمان‌هایی در حدود ۳۰ تا ۱۰۰ ساعت تأکید دارند. زمان و دمای بالای فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی آلومیناید تیتانیم گاما، ناشی از ضریب نفوذ پایین نیتروژن به زیرلایه [۱۳] و تشکیل لایه‌های غیرفعال اکسیدی در سطح است [۱۴] که محدودیت‌های اقتصادی و صنعتی زیادی را با خود به همراه دارد. تقویت پلازما با استفاده از کاتد کمکی از جمله راه‌کارهای موجود جهت حذف بهتر لایه‌های غیرفعال سطحی و نیز کاهش زمان فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد اثر فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی با استفاده از کاتد کمکی^۳ (ACN) بر خواص سطحی آلیاژ آلومیناید

1. nitrided compound layer

2. diffusion zone

3. auxiliary cathode plasma nitriding (ACN)

تیتانیم گاما، تاکنون مورد تحقیق قرار نگرفته و یا نتایج آن منتشر نشده است. با توجه به اهمیت و استفاده فراوان آلیاژهای آلومیناید تیتانیم گاما در صنایع مختلف، خصوصاً صنایع دفاعی و هوافضا، در این مقاله تأثیر به-کارگیری کاتد کمکی جهت ارتقاء فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش از آزمون‌های مشخصه‌یابی مختلفی نظیر FESEM، EDS، XRD و نیز آزمون‌های سختی‌سنجی سطح جهت بررسی و تحلیل موضوع استفاده شده است.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ آلومیناید تیتانیم گاما با ترکیب شیمیایی اسمی $Ti-48Al-2Cr-2Nb$ (at.%) به‌عنوان زیرلایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ بر اساس آزمون طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس با تفکیک طول موج^۱ (Philips-PW2404)، در جدول ۱ آورده شده است. با استفاده از دستگاه برش با سیم^۲ (Charmilles- Robofil 200)، قرص‌هایی با قطر ۵۸ و ضخامت ۴ میلی‌متر از گرده اولیه بریده شد. جهت حصول ریزساختاری با دانه‌های هم‌محور، فرایند نرماله‌کردن نمونه‌ها در دمای ۱۳۸۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۵ دقیقه در مجاورت با گاز آرگن انجام شد. پس از اتمام فرایند، همه نمونه‌ها در هوای محیط و با سرعت متوسط ۳۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه سرد شدند. به‌منظور حصول صافی سطح مناسب و نیز حذف لایه اکسیدی ناشی از عملیات حرارتی و برش‌کاری، سطوح نمونه‌ها با استفاده از سنگ مغناطیس به اندازه ۲۰۰ میکرومتر باربرداری شدند. درنهایت جهت کاهش زبری سطح، نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های شماره ۸۰ تا ۳۰۰۰ به صورت دستی و یکنواخت پرداخت کاری شدند.

در این تحقیق از دستگاه نیتروژن دهی پلاسمایی جریان مستقیم پالسی (موجود در آزمایشگاه دانشکده مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان) استفاده شد. تصویری نمادین از سامانه نیتروژن دهی پلاسمایی با استفاده از کاتد کمکی در شکل ۱ نمایش داده شده است. این دستگاه مجهز به سامانه آب‌گرد برای خنک کردن محفظه است. اختلاط گازها با استفاده از شارسنگ^۳‌های نصب‌شده به صورت مجزا در مسیر هر گاز، انجام می‌شود. در کلیه فرایندها از گازهای نیتروژن، هیدروژن و آرگن با خلوص ۹۹/۹۹۹ درصد حجمی استفاده شد. به‌منظور افزایش سقف دمای کاری دستگاه تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، از یک سامانه گرمایشی کمکی تابشی استفاده شد. به‌منظور کاهش پراکنش عناصر موجود در پایه محفظه، از یک صفحه تیتانیومی از جنس $Ti-6Al-4V$ (wt.%) با قطر ۱۵۰ و ضخامت ۲۰ میلی‌متر به‌عنوان کاتد متصل به قطب منفی استفاده شد. کاتد کمکی از جنس کاتد اصلی با قطر ۱۵۰ و ضخامت ۵ میلی‌متر تهیه شد و در فاصله ۲۰ میلی‌متری از سطح کاتد اصلی قرار گرفت. پایه ننگه‌دارنده کاتد کمکی از همان جنس و به شکل استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ضخامت ۲۰ میلی‌متر ساخته شد. نمونه‌ها

1. wavelength dispersive X-ray fluorescence (WD-XRF)

2. wire cut

3. flowmeter

با چپش متقارن، روی کاتد اصلی و در زیر کاتد کمکی قرار گرفتند. دمای فرایند، توسط دماپای^۱ متصل به نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. به دلیل حساسیت شدید آلیازهای تیتانیومی به آلودگی‌های محیطی، سطح داخلی سامانه و صفحه کاتد قبل از هر بار اجرای چرخه توسط سنباده‌های شماره ۶۰۰ و ۱۰۰۰ پرداخت و در ادامه با مایع استن شسته شد. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی، به مدت پانزده دقیقه در دستگاه فراصوت درون مایع استن قرار گرفتند تا آلودگی‌های سطحی برطرف شوند. همچنین به منظور حذف اثرات لبه^۲ پلاسمایی، کلیه نمونه‌ها به فاصله یک سانتی‌متر از لبه کاتد و یکدیگر قرار گرفتند. بعد از چیدمان نمونه‌ها و بستن درب محفظه، پمپ خلاء دستگاه روشن و خلاء ۰/۰۳۶ تور در داخل محفظه دستگاه ایجاد شد. در مرحله بعدی با ورود گازهای هیدروژن و آرگن، فشار تا ۱۰ تور افزایش یافت. افزایش فشار در این مرحله به منظور تخلیه هوای داخل محفظه انجام شد. مجدداً، فشار با فعالیت پمپ خلاء چرخشی تا 5×10^{-3} تور کاهش یافت. پس از ایجاد خلاء مناسب، این بار گازهای آرگن و هیدروژن با نسبت دو به یک و فشار ۰/۳ تور، به منظور ایجاد پراکنش وارد مجموعه شدند. با برقراری جریان بین آند و کاتد، پلازما فعال شد و به مدت یک ساعت عملیات پراکنش سطحی ادامه یافت. این عمل به منظور حذف لایه اکسیدی سطح و ایجاد شرایط مناسب برای نفوذ اتم‌های نیتروژن انجام شد. در اثر عملیات پراکنش، دمای نمونه‌ها تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. پس از این مرحله و رسیدن دما به کمک منبع پلازما تا حدود ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد (با نرخ ۲/۵ درجه بر دقیقه)، ولتاژ دستگاه بر اساس دمای نمونه افزایش یافت و منبع حرارتی کمکی وارد مدار شد. در مرحله دوم نرخ افزایش دما ۲ درجه بر دقیقه اندازه‌گیری شد. با رسیدن دمای محفظه به ۷۸۰ درجه سانتی‌گراد، گاز نیتروژن به آرامی وارد محفظه شد. در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، نسبت حجمی نیتروژن و هیدروژن (N_2/H_2) به عدد یک رسید و تا پایان آزمایش این نسبت گازی با حدود فشار ۵ تور رعایت شد. پس از پایان زمان نیتروژن‌دهی، پلازما قطع شد و فشار مجدداً تا 5×10^{-3} تور کاهش یافت. این عمل به منظور حذف واکنش‌های احتمالی نمونه با اتمسفر داخلی انجام شد. سرمایش نمونه‌ها و سامانه گرمایشی تابشی در محیط خلاء با سرعت متوسط ۲/۶ درجه بر دقیقه و به مدت ۲۷۰ دقیقه به طول انجامید. پس از سرمایش کامل نمونه‌ها، خلاء محفظه شکسته شد. در این تحقیق، ولتاژ کاری، دوره کاری و فرکانس در مرحله نیتروژن‌دهی به ترتیب در مقدار ثابت 20 ± 600 ولت، ۷۰ درصد و ۸ کیلوهرتز تنظیم شد. همچنین جریان در مرحله پراکنش و نیتروژن‌دهی به ترتیب برابر ۰/۹ و ۴/۵ آمپر در نظر گرفته شد. عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی با استفاده از کاتد کمکی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و در زمان‌های ۳، ۶ و ۹ ساعت انجام شد. نمونه‌های حاصل از هر فرایند بسته به زمان عملیات با نمادهای ACN_3 ، ACN_6 و ACN_9 نام‌گذاری شدند.

به منظور جلوگیری از تخریب لایه‌های نیتریدی حین عملیات آماده‌سازی سطح لایه‌ای از جنس مس و با ضخامتی در حدود ۵ میکرون به روش آب‌کاری برقی روی نمونه‌ها ترسیب شد. کلیه نمونه‌ها بعد از

1. thermocouple
2. edge effect

پوشش دهی، مانیت و سپس پرداخت شدند. در انتها از پودر آلومینای ۱ میکرونی و پارچه نمادی به منظور پرداخت نهایی سطح استفاده شد. به منظور حکاکی کردن^۱ نمونه‌ها از محلولی^۲ شامل ۵۰ میلی‌لیتر گلیسرین، ۲۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک، ۲ میلی‌لیتر اسید فلئوریدریک و ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر دوبار تقطیر، به روش مالشی و به مدت ۵ ثانیه استفاده شد [۱۵].

از ریزنگار الکترونی روبشی با نشر میدانی^۳ (TESCAN-MIRA3 LMU)، جهت تصویربرداری در بزرگنمایی‌های بالا و تهیه آنالیز خطی به روش طیف‌سنجی به کمک تفکیک انرژی^۴ استفاده شد. به منظور شناسایی نوع فازها از دستگاه پراش سنج پرتو ایکس (Philips MPD-Xpert) با شعاع کاری ۵ تا ۱۴۰ درجه با هدف مسی و فیلتر نیکلی استفاده شد. آزمون پراش سنجی اشعه ایکس با اندازه گام ۰/۰۲۶ درجه، زمان توقف ۱ ثانیه و محدوده ۲θ از ۳۰ تا ۸۰ درجه روی زیرلایه و نیز نیتروژن انجام شد. به منظور ارزیابی خواص سطحی، ریزسختی‌سنجی سطح زیرلایه و نیتروژن در بار اعمالی ۰/۱ نیوتن با استفاده از دستگاه سختی‌سنجی (Wilson-MVD 402) با زمان اعمال نیروی ۱۰ ثانیه و در مقیاس ویکرز استفاده شد. تمامی آزمون‌های سختی‌سنجی با ۱۰ بار تکرار انجام شدند.

نتایج و بحث

با توجه به تصاویر ریزنگاری الکترونی روبشی از سطح مقطع عرضی نمونه‌ها در شکل ۲، با افزایش زمان فرایند، ضخامت لایه ترکیبی و عمق ناحیه نفوذی افزایش یافته است. حداقل ضخامت لایه ترکیبی در حدود ۱/۵ میکرومتر برای نمونه ACN₃ قابل مشاهده است. مطابق با شکل ۱ قسمت الف، محدوده ناحیه نفوذی ACN₃ در تصویر ریزنگاری الکترونی قابل تشخیص نیست. با توجه به تشکیل لایه ترکیبی و عدم حضور محدوده نفوذی در اولین ساعات فرایند، می‌توان نتیجه گرفت که ابتدا لایه ترکیبی و سپس ناحیه نفوذی ایجاد شده است. علت تراکم نیتروژن در لایه‌های سطحی را می‌توان ناشی از ضریب نفوذ پایین نیتروژن در آلومینایدهای تیتانیم گاما دانست [۱۶]؛ بنابراین، نیتروژن در لایه‌های سطحی تجمع می‌کند و شرایط مناسبی را برای تشکیل لایه ترکیبی فراهم می‌سازد [۴]. بر اساس سازوکار "تجمع و رهایی" با افزایش زمان عملیات، ضخامت لایه ترکیبی افزایش و نیتروژن اضافی به لایه‌های پایین‌تر منتقل می‌شود تا ناحیه نفوذی را تشکیل دهد. کم‌بودن میزان عمق ناحیه نفوذی نسبت به ضخامت لایه ترکیبی در تصاویر ریزنگاری شکل ۱ قسمت‌های ب و ج صحت این فرضیه را اثبات می‌کند. نمودار شکل ۳ وجود یک رابطه معنی‌دار بین ضخامت لایه ترکیبی (R_c) و ناحیه نفوذی (R_d) را نشان می‌دهد. نسبت ضخامت لایه ترکیبی به ناحیه نفوذی (R_{c/d}) برای این فرایند عددی در حدود ۴ است. در

1. etching

2. Baeslack

3. field emission scanning electron microscopy (FE-SEM)

4. energy dispersive spectroscopy (EDS)

صورت محاسبه این نسبت برای دیگر آلیاژهای تیتانیوم با مقدار آلومینیم کم تر، عدد ۰/۰۵ تا ۰/۱ به دست خواهد آمد [۱۷ و ۱۸] که نقش عنصر آلومینیم و ضریب نفوذ پایین نیتروژن در آلومینیم را به خوبی تأیید می کند. شکل ۴ نتایج آنالیز عنصری خطی به کمک طیف سنجی توزیع انرژی از مقطع عرضی نمونه ها را نشان می دهد. آلیاژ آلومیناید تیتانیوم گاما در دمای بالا حتی با خلأ نسبی درون محفظه، میل ترکیبی زیادی جهت تشکیل اکسید تیتانیوم و آلومینیم متراکم و چسبنده در سطح خود دارد. به علت فشار بالا در منطقه پلاسمای محصور بین دو کاتد، شرایط ورود اکسیژن دشوار می شود. همچنین شدت بالای یونیزه شدن پلاسمای محصور، منجر به افزایش چگالی یون های فعال هیدروژن در داخل پلاسمای می شود و با تشکیل مولکول های آب، اکسیژن موجود در پلاسمای به شدت کاهش می یابد. به این ترتیب احتمال تشکیل لایه های غیرفعال سطحی که به عنوان سد نفوذی عمل می کنند به شدت کاهش می یابد. در نتیجه با افزایش مدت فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی، غلظت و عمق نفوذ نیتروژن در لایه های سطحی افزایش می یابد. در تمامی نمودارهای آنالیز عنصری خطی به کمک طیف سنجی توزیع انرژی، غلظت عناصر تیتانیوم، آلومینیم، نیوبیم و کروم در سطح کاهش یافته است و به عبارتی این عناصر از سطح ماده به سمت زیر لایه حرکت کرده اند. ضریب نفوذ عناصر در سامانه آلیاژی آلومیناید تیتانیوم گاما در دمای فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی (۸۰۰ درجه سانتی گراد) به صورت $D_{Nb} < D_{Ti} < D_{Al} < D_{Cr}$ است [۱۹]. آلومینیم به دلیل ضریب نفوذ بالاتر نسبت به تیتانیوم، با سرعت بالاتری حرکت می کند و در نتیجه مقدار آن در سطح با کاهش بیشتری همراه است؛ بنابراین لایه نیتريدی سطحی بیرونی و داخلی به ترتیب حاوی درصد اتمی کم تر و بیش تری از عنصر آلومینیم است.

بررسی نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس در شکل ۵، تشکیل فازهای $TiAl$ (γ) و Ti_3Al (α_2) در زیر لایه و فازهای نیتريدی TiN و Ti_2AlN را برای نمونه های نیتروژن دهی شده نمایش می دهد. نتایج آزمون تفرق سنجی اشعه ایکس با تحقیقات مشابه در این زمینه مطابقت دارد [۱۰-۱۲]. با توجه به رنگ ارغوانی نمونه ها بعد از فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی، احتمال وجود AlN (دودی رنگ) در سطح ماده و مخلوط با TiN (طلایی رنگ) وجود دارد [۲۰]. این ترکیب در اثر پراکنش آلومینیم موجود در سطح کاتدها ایجاد شده و حین فرایند روی سطح ماده رسوب کرده است. به علت پایین بودن مقدار AlN ، این ترکیب توسط تفرق اشعه ایکس قابل شناسایی نیست. در تمامی فرایندها با افزایش زمان، مقدار فازهای نیتريدی افزایش می یابد که با مقایسه شدت پیک های مربوط به هر فاز قابل تشخیص است. از آنجا که با افزایش زمان فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی، ضخامت لایه نیتريدی افزایش یافته، به تدریج از شدت تفرق صفحات بلوری زیر لایه نیز کاسته شده است.

شکل ۶، نتایج آزمون ریزسختی سنجی از سطح نمونه ها، بعد از فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی را نشان می دهد. مطالعه رفتار ریزسختی سطح نمونه ها نشان می دهد که به طور کلی با افزایش زمان عملیات نیتروژن دهی، سختی سطح نمونه ها افزایش یافته است. سختی سطح بعد از ۹ ساعت نیتروژن دهی پلاسمایی تا حدود $HV_{0.01} 2100$ افزایش یافته است که در حدود ۴ برابر سختی زیر لایه است. نمودار توزیع سختی سطح، نشان می دهد که مناطق مختلف در سطح به جز لبه نمونه دارای سختی تقریباً یکسانی هستند. یکنواختی عدد سختی در سطح، یکنواختی

لایه‌های نیتريدی و در نهایت یکنواختی توزیع پلازما را تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات، تحلیل و بررسی نتایج آزمون‌های مشخصه‌یابی پژوهش حاضر، نتایج زیر را می‌توان استنباط نمود:

(۱) استفاده از پدیده کاتد توخالی منجر به افزایش چگالی یون‌های نیتروژن و هیدروژن و نیز یکنواختی توزیع پلازما در سطح کاتد می‌شود.

(۲) افزایش غلظت یون هیدروژن منجر به احیای شدن محیط پلازما و حذف اکسیژن در منطقه محصور پلازما می‌شود و از تشکیل لایه‌های غیرفعال سطحی پیشگیری می‌کند.

(۳) سازوکار اصلی در فرایند نیتروژن‌دهی آلومیناید تیتانیم گاما، تحت تأثیر ضریب نفوذ پایین نیتروژن در آلومینیم قرار دارد و به صورت "تجمع و رهایی" صورت می‌پذیرد.

(۴) ترکیبات TiN و Ti_2AlN فازهای اصلی سازنده لایه ترکیبی بعد از فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی آلومیناید تیتانیم گاما هستند.

(۵) با استفاده از کاتد کمکی، سختی سطح نمونه‌ها به صورت یکنواخت تا ۴ برابر سختی زیرلایه افزایش می‌یابد.

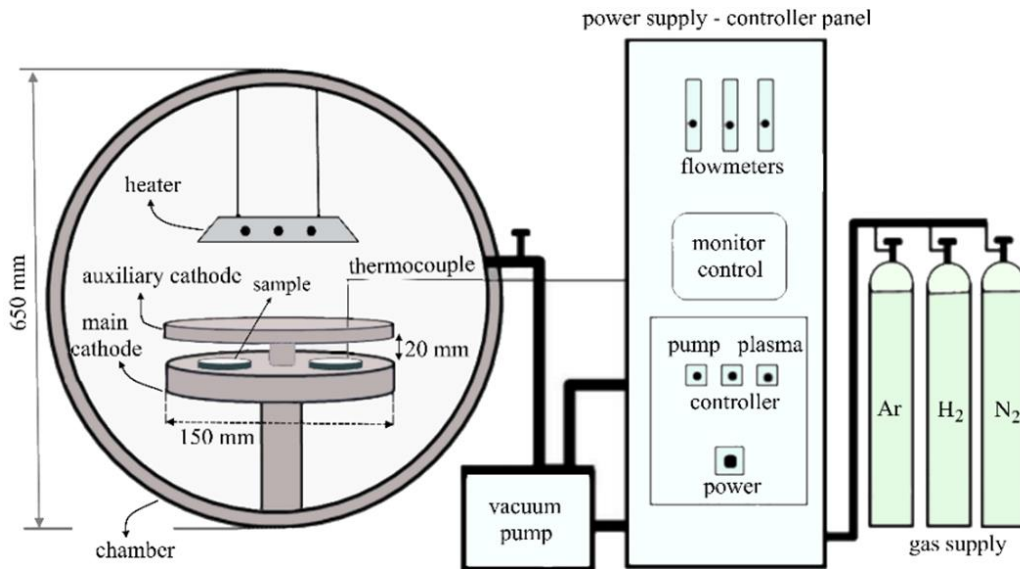
مراجع

- [1]. K. Kothari, R. Radhakrishnan and N. M. Wereley, "Advances in Gamma Titanium Aluminides and Their Manufacturing Techniques", *Progress in Aerospace Sciences*, 55, 2012, 1-16.
- [2]. M. Yamaguchi, H. Inui and K. Ito, "High Temperature Structural Intermetallics", *Acta Materialia*, 48, 2000, 307-322.
- [3]. J. Xia, H. Dong and T. Bell, "Surface Properties of a γ -Based Titanium Aluminide at Elevated Temperatures", *Intermetallics*, 10, 2002, 723-729.
- [4]. B. Zhao and et al., "Gas Nitriding Behavior of TiAl Based Alloys in an Ammonia Atmosphere", *Scripta Materialia*, 46-8, 2002, 581-586.
- [5]. L. Aihua, D. Jianxin, C. Haibing, C. Yangyang and Z. Jun, "Friction and Wear Properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD Nitride Coatings", *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 31, 2012, 82-88.
- [6]. A. R. Rastkar, B. Shokri and T. Bell, "Structural and Mechanical Evaluation of the Effect of Oxygen Boost Diffusion on a Gamma Based Titanium Aluminide of Ti-45Al-2Nb-2Mn-1B", *Surface and Coatings Technology*, 202-24, 2008, 6038-6048.
- [7]. X. Liu and et al., "Wear Resistance of TiAl Intermetallics by Plasma Alloying and Plasma Carburization", *Surface and Coatings Technology*, 201-11, 2007, 5278-5281.
- [8]. J. C. Walker, I. M. Ross, C. Reinhard and W. M. Rainforth, "High Temperature Tribological Performance of CrAlYN/CrN Nanoscale Multilayer Coatings Deposited on Gamma-TiAl", *Wear*, 267, 2009, 965-975.

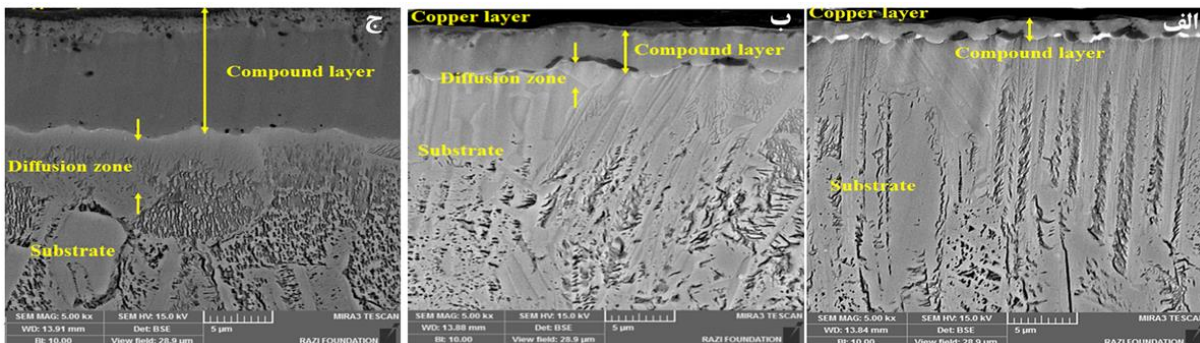
- [9]. L. Swadzba, G. Moskal, M. Hetmanczyk and B. Mendala, “Long-Term Cyclic Oxidation of Al–Si Diffusion Coatings Deposited by Arc-PVD on TiAlCrNb Alloy”, *Surface and Coatings Technology*, 184, 2004, 93–101.
- [10]. C. L. Chu and S. K. Wu, “Ion Nitriding of Titanium Aluminides with 25–53 (at.%) Al: Nitriding Parameters and Microstructure Characterization”, *Surface and Coatings Technology*, 78-3, 1996, 211-218.
- [11]. A. R. Rastkar and T. Bell, “Tribological Performance of Plasma Nitrided Gamma Based Titanium Aluminides”, *Wear*, 253-12, 2002, 1121-1131.
- [12]. A. M. Abd El-Rahman and et al., “Surface Improvement and Biocompatibility of TiAl₂₄Nb₁₀ Intermetallic Alloy Using RF Plasma Nitriding”, *Applied Surface Science*, 253, 2007, 9067-9072.
- [13]. P. Visuttipitukul, T. Aizawa and H. Kuwahara, “Feasibility of Plasma Nitriding for Effective Surface Treatment of Pure Aluminum”, *Materials Transactions*, 44, 2003, 1412 - 1418.
- [14]. T. Fitz, Ion nitriding of aluminium, 2002, Rossendorf, Wissenschaftlich-Technische Berichte.
- [15]. W. A. Baeslack, P. A. McQuay, D. S. Lee and E. D. Fletcher, “Metallography of Gamma Titanium Aluminides”, *Material Characterization*, 31, 1993, 197-207.
- [16]. F. Appel, J. D. H. Paul and M. Oehring, Gamma Titanium Aluminide Alloys, 2011, Wiley VCH.
- [17]. S. Taktak and H. Akbulut, “Dry Wear and Friction Behaviour of Plasma Nitrided Ti–6Al–4V Alloy after Explosive Shock Treatment”, *Tribology International*, 40, 2007, 423–432.
- [18]. V. Fouquet, L. Pichon, A. Straboni and M. Drouet, “Nitridation of Ti6Al4V by PBII: Study of the Nitrogen Diffusion and of the Nitride Growth Mechanism”, *Surface and Coatings Technology*, 186, 2004, 34–39.
- [19]. S. Xiaoguo, C. Jian, L. Jiakun, Z. Liyan and F. Jicai, “Reaction-Diffusion Bonding of High Nb Containing TiAl Alloy”, *Rare Metal Materials and Engineering*, 43, 2014, 28-31.
- [20]. J. C. Bryar, M. H. Jacobs and M. A. Ashworth, “Surface Modification of TiAl Based Intermetallis by Pressure Nitriding”, *Surface Engineering*, 16-2, 2000, 107-115.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومیناید تیتانیم مورد استفاده در این تحقیق

نوع عنصر	تیتانیم	آلومینیم	کروم	نیویوم	سایر
میزان عناصر (درصد اتمی)	۴۶/۷۱۸	۴۹/۷۸۹	۱/۶۱۲	۱/۸۸	۰/۰۰۱

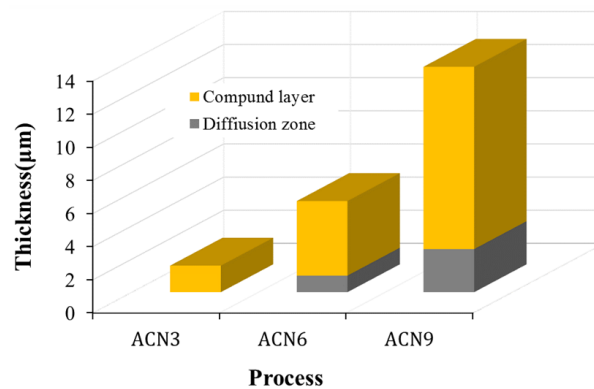


شکل ۱: تصویر نمادین از سامانه نیتروژن دهی پلاسمایی و نحوه استقرار کاتد کمکی در آن.

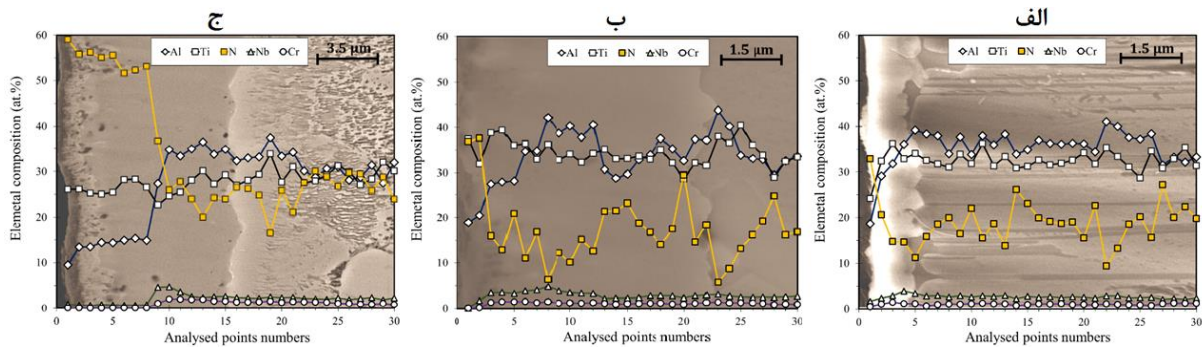


شکل ۲: تصاویر ریزنگاری الکترونی روبشی با نشر میدانی از مقطع عرضی

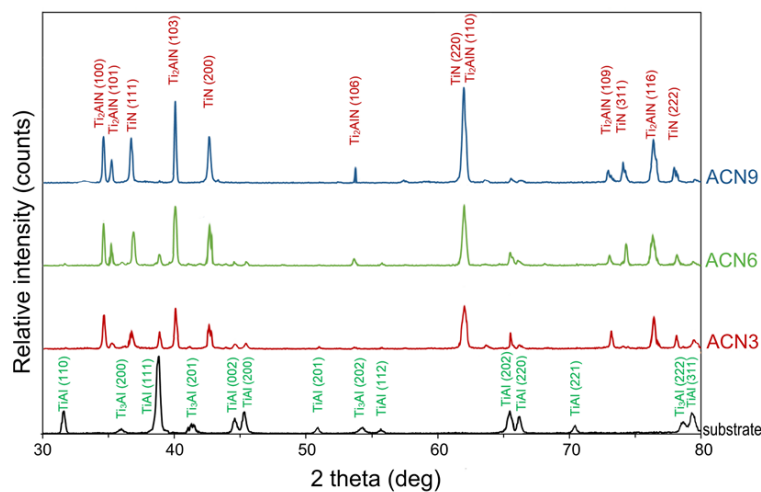
نمونه‌های الف) (ACN₃، ب) (ACN₆ و ج) (ACN₉).



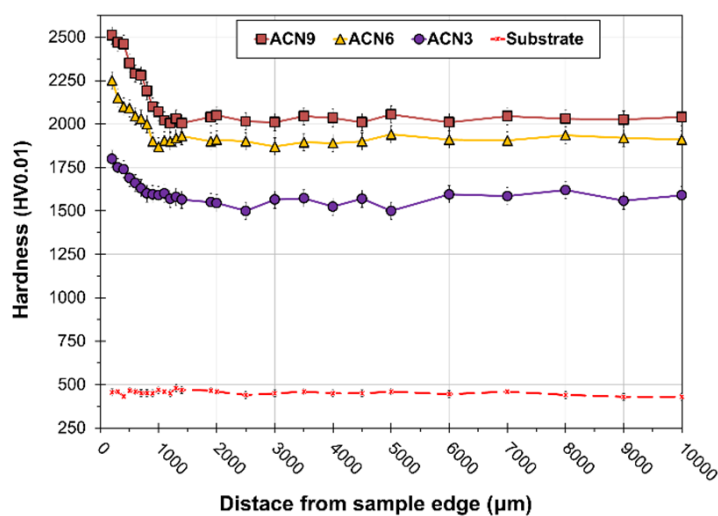
شکل ۳: روند تغییرات ضخامت لایه ترکیبی و ناحیه نفوذی بعد از فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی.



شکل ۴: نتایج طیف سنجی توزیع انرژی خطی در ۳۰ نقطه منطبق بر تصاویر ریزنگاری الکترونی روبشی با استفاده از الکترون‌های برگشتی، برای نمونه‌های حاصل از فرایند نیتروژن‌دهی با استفاده از کاتد کمکی در زمان‌های (الف) ۳، (ب) ۶ و (ج) ۹ ساعت.



شکل ۵: تصویر الگوی‌های پراش پرتو ایکس، قبل و بعد از فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی در زمان‌های مختلف.



شکل ۶: روند تغییرات سختی در مقیاس ریزویکرز و بار ۰/۱ نیوتن (HV0.01) در سطح زیرلایه و نمونه‌های نیتروژن‌دهی شده با استفاده از کاتد کمکی (ACN) در زمان‌های ۳، ۶ و ۹ ساعت.