

آلیاژسازی سطحی Ti-6Al-4V با نیتروژن و کروم به وسیله فرایند قوس تنگستن به منظور بهبود خواص تریبولوژیکی

غلامرضا فغانی^{۱*} و علیرضا خواجه‌امیری^۲

۱- گروه مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء (ص)، تهران، ایران

۲- مرکز تحقیقاتی توکسین، دانشگاه علوم پزشکی آجا، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۵/۱۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۹/۲۳)

چکیده- آلیاژ Ti-6Al-4V به دلیل خواص ویژه‌ای از جمله چگالی کم، استحکام و مقاومت به خوردگی بالا کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف به ویژه هوافضا پیدا کرده است. با این حال، یکی از مشکلات عمده استفاده از این آلیاژ، خواص تریبولوژیکی ضعیف آن تحت بارهای نسبتاً زیاد است. در پژوهش حاضر، به منظور بهبود خواص تریبولوژیکی آلیاژ (Ti-6Al-4V)، از اضافه کردن ذرات کروم به ورق در محیط حاوی نیتروژن در فرایند جوشکاری قوس تنگستن (TIG) استفاده شد. بررسی‌های ریزساختاری به کمک میکروسکوپ نوری، آنالیز پراش پرتوی ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی، تشکیل ذرات TiN، TiCr₂ و Cr₂N در زمینه‌ای از فاز سخت تیتانیم را تأیید کرد. سختی لایه آلیاژی شده با TIG به ۱۰۰۰ HV_{0.3} افزایش یافت که چهار برابر بیشتر از سختی آلیاژ پایه بود. همچنین، نرخ سایش نمونه‌های آلیاژسازی شده با کروم و نیتروژن تحت بار ۳۰ نیوتن و مسافت ۱۰۰۰ متر، ۵/۹ برابر نسبت به نمونه آلیاژ بدون پوشش، کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: سختی، سایش، آلیاژ Ti-6Al-4V، فرایند قوس تنگستن، میکروساختار

TIG Surface Alloying of Ti-6Al-4V with Nitrogen and Chromium for Improved Tribological Properties

G. R. Faghani^{1*} and A. R. Khajeh-Amiri²

1- Materials Department, Faculty of Mechanical Engineering, Khatam-Ol-Anbia (PBU) University, Tehran, Iran.

2- Toxin Research Institute, Aja University of Medical Science, Tehran, Iran.

Abstract: Due to special properties such as low density, high strength and high corrosion resistance Ti-6Al-4V alloy has been used extensively in various industries, especially in the aerospace aspects. However the major problem of this alloy is its poor tribological properties under relatively high loads. In the present study, in order to improve the tribological properties of mentioned alloy, chromium particles were added to Ti-6Al-4V layers in the nitrogen-containing atmosphere during the Tungsten Inert Gas (TIG) welding process. Microstructural investigations using optical microscopy, X-ray diffraction analysis and

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: g.r.faghani@stu.nit.ac.ir

scanning electron microscopy, proved the formation of TiN, TiCr₂ and Cr₂N particles in the matrix of hard titanium phase. The hardness of TIG alloyed layer increased to 1000 HV_{0.3} which was 4 times higher than that of the base alloy. Moreover, the wear rate of TIG alloyed samples with chromium and nitrogen under 30N load and distance of 1000 m was 5.9 times lower than that of the bare Ti-6Al-4V alloy.

Keywords: Hardness, Wear, Ti-6Al-4V alloy, TIG process, Microstructure.

۱- مقدمه

آلیاژهای تیتانیوم، دارای خواص کم‌نظیری چون نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی مناسب، مقاومت به خزش عالی، خواص مناسب در دمای محیط تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و زیست‌سازگاری مناسب هستند [۱-۳]. همین موضوع باعث کاربردهای فراوان آنها در صنایع هوافضا، شیمیایی، دریایی، تجهیزات و قطعات پزشکی شده است [۴-۶]. محدودیت اصلی آلیاژهای تیتانیوم خواص تریبولژیکی نامناسب (اصطکاک بالا و نرخ سایش زیاد) است که به‌کارگیری این آلیاژ را با محدودیت‌هایی مواجه کرده است [۷ و ۸]. بنابراین بهبود رفتار تریبولژیکی، یکی از مهم‌ترین اهداف تحقیقات در حال انجام روی تیتانیوم و آلیاژهای آن است. مهندسی سطح، از جمله مؤثرترین روش‌ها برای بهبود خواص تریبولژیکی و مقاوم‌سازی قطعات در مقابل پدیده‌هایی مانند سایش، خوردگی و اکسیداسیون است [۹]. بدین منظور از روش‌های ذوب سطحی توسط پرتوهای پراثری، مانند پرتو الکترونی، پرتو لیزر و دستگاه‌های تولید قوس مانند TIG برای ایجاد لایه‌هایی با خواص تریبولژیکی مناسب‌تر استفاده می‌شود [۱۰]. در این راستا، با استفاده از منابع متمرکز انرژی اشاره شده، لایه‌های ذوب سطحی، آلیاژسازی سطحی و لایه‌های کامپوزیتی سطحی تولید شدند [۱۰ و ۱۱]. در عملیات ذوب سطحی، چگالی انرژی ورودی قوس بسیار حائز اهمیت بوده چرا که مقدار این چگالی تعیین‌کننده گرمای ورودی به ریزساختار و به تبع آن خواص فیزیکی و خواص مکانیکی ماده مؤثر است [۱۱-۱۳]. چگالی انرژی ورودی قوس از رابطه (۱) به‌دست می‌آید:

$$E = (\eta \times V \times I) / S \quad (1)$$

در این رابطه، η ضریب بازدهی قوس بوده که همیشه کمتر از یک و معمولاً ۴۸ درصد در نظر گرفته می‌شود، زیرا که همیشه

اتلاف انرژی حرارتی به روش‌های متفاوت وجود دارد. V ولتاژ، I جریان، S سرعت جوشکاری است [۱۴]. در فرایند جوشکاری قوس تنگستن ابعاد حوضچه، تابعی از شدت جریان و سرعت انجام عملیات جوشکاری است. برخی از لایه‌های کامپوزیتی از واکنش میان عناصری از قبیل N ، B ، C و حتی O با زمینه تولید می‌شوند که می‌تواند موجب ایجاد یک فاز تقویت‌کننده سخت مانند TiC ، TiN و TiB_2 شود [۱۵].

یکی از روش‌های افزودن عنصر آلیاژی به حوضچه مذاب، دمیدن گاز فعال مانند نیتروژن و یا انجام فرایند ذوب سطحی در محفظه حاوی گاز فعال است. با استفاده از این روش، گاز نیتروژن وارد مذاب شده، با عناصر موجود در حوضچه واکنش می‌دهد که این امر به تشکیل فازهای سخت نیتریدی منجر می‌شود [۱۶-۱۸]. برخی پژوهشگران، در حین ذوب سطحی تیتانیوم با فرایند لیزر، گاز نیتروژن را به مذاب دمیده و با تشکیل دندریت‌های بر مبنای TiN در زمینه تیتانیوم، لایه کامپوزیتی با ضخامت مناسب تولید کردند. بر اساس نتایج، سختی و مقاومت به سایش لایه کامپوزیتی به ترتیب ۱۲ و ۶ برابر آلیاژ پایه بهبود یافت [۱۹-۲۱]. در تحقیقات دیگر، با استفاده از فرایند قوس تنگستن در حین ذوب سطحی تیتانیوم، گاز نیتروژن به حوضچه وارد شده و لایه‌ای سخت و مقاوم به سایش بر مبنای فاز TiN تشکیل داد. سختی لایه تشکیل شده تا چهار برابر فلز پایه افزایش یافت. ریزساختار نواحی مختلف لایه‌های تشکیل شده، دندریت‌های نیترید تیتانیوم در فاصله ۰/۱ میلی‌متری از سطح بود، ضمن اینکه ریزساختار مارتنزیتی نیز مشاهده شد [۲۱ و ۲۲]. در پژوهشی دیگر، توسط فرایند قوس تنگستن، سطح تیتانیوم خالص ذوب شده و با استفاده از گاز نیتروژن و پودر آلومینیوم، لایه‌های کامپوزیتی به‌روش درجا تولید شد. طبق نتایج، حضور نیتروژن در حوضچه مذاب منجر به تشکیل سه ترکیب TiN ، $TiAl_3$ و

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ پایه

عنصر	Al	V	Fe	O	H	Ti
درصد وزنی	۵/۶۲	۳/۵۱	<۰/۰۲	<۰/۰۲۳	<۰/۰۱۱	مقدار باقیمانده

Ti₃Al₂N₂ با مورفولوژی دندریتی شده است. مقاومت به سایش آلیاژ نیز تا حدود هفت برابر نسبت به آلیاژ پایه افزایش پیدا کرد [۲۲].

در تحقیقی دیگر، با تزریق درصد‌های مختلف (۲۰ و ۱۰۰ درصد) از گاز نیتروژن به داخل حوضچه مذاب حاصل از فرایند TIG، لایه سخت حاوی فازهای TiN و Ti₂N روی آلیاژ تیتانیم تشکیل شد. سختی لایه به دست آمده در مقایسه با فلز پایه، از HV_{0.3} ۲۵۰ به حدود HV_{0.3} ۹۰۰ رسید و مقاومت به سایش نیز به مقدار زیادی بهبود یافت. همچنین در اثر تشکیل فازهای سخت، مکانیزم سایش نیز تغییر کرد. در مقایسه با لایه ایجاد شده توسط لیزر مشاهده شد که در روش جوشکاری قوس تنگستن مقدار سختی تا عمق بیشتری از سطح حفظ می‌شود و توزیع یکنواخت‌تری از سختی به دست می‌آید [۲۳].

در پژوهش حاضر، منبع حرارتی قوس تنگستن در تأمین انرژی لازم برای ذوب سطحی تیتانیم به کار گرفته شد. همچنین برای ایجاد لایه‌های سطحی بر مبنای نیتريد تیتانیم، از محیط حاوی گاز نیتروژن استفاده شد. پودر کروم نیز علاوه بر قابلیت نیتريدزایی، به عنوان عنصر پایدارکننده فاز بتا، برای اصلاح ریزساختار لایه‌های سطحی، قبل از عملیات ذوب روی سطح نمونه، پیش‌نشست شد. با توجه به تشکیل فازهای سخت نیتريدی در زمینه فاز به نسبت نرم بتا، انتظار می‌رود که این لایه‌های کامپوزیتی سطحی ایجاد شده، خواص سایشی آلیاژ را ارتقا بخشند.

۲- مواد و روش تحقیق

از آلیاژ Ti-6Al-4V با ترکیب مشخص شده در جدول (۱) با ابعاد ۵۰×۵۰×۸ میلی‌متر مکعب به عنوان زیرلایه برای انجام عملیات آلیاژسازی سطحی استفاده شد. قبل از اینکه نمونه‌ها تحت عملیات

جوشکاری قوس تنگستن قرار گیرند، اکسیدها و آلودگی‌های سطحی از روی سطح نمونه‌ها با کاغذ سنباده و استون کاملاً تمیز شدند. در این تحقیق، برای آلیاژسازی سطحی از پودر کروم خالص با اندازه کوچک‌تر از ۵۰ میکرومتر در محیط مخلوط آرگون و گاز فعال نیتروژن با نسبت ۵۰-۵۰ استفاده شد. به منظور چسباندن پودر گفته شده روی نمونه‌ها، چسب پلی‌وینیل‌الکل (PVA) به کار رفته و سپس با استفاده از خط‌کش و کولیس، ضخامت لایه مورد نظر روی سطح، ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای انجام عملیات قوس تنگستن، از یک میز x-y که قابلیت تنظیم سرعت‌های مختلف را داشت، استفاده شد. برای تأمین انرژی مورد نیاز فرایند، یک دستگاه TIG مدل Merkley TIG 200 AC/DC به کار رفت. از گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۹ درصد و فشار چهار لیتر بر دقیقه به عنوان گاز خنثی و از گاز نیتروژن با خلوص ۹۹/۹۹۹ درصد و فشار چهار لیتر بر دقیقه به عنوان گاز فعال برای شرکت در عملیات آلیاژسازی سطحی استفاده شد. الکتروود به کار رفته از نوع غیرمصرفی و از جنس تنگستن با دو درصد توریم به قطر ۲/۴ میلی‌متر با نوک تیز و طول مؤثر در حدود شش میلی‌متر و همچنین نوع جریان مورد استفاده DCEN (جریان مستقیم) و برابر ۱۰۰ آمپر و ولتاژ اعمالی در همه نمونه‌ها ثابت و برابر با ۱۵ ولت بود. برای بررسی بهتر نتایج پژوهش انجام شده، بررسی‌های ریزساختاری، سختی و سایش روی نمونه اولیه (P1)، نمونه تحت ذوب سطحی (P2)، نمونه تحت ذوب سطحی در محیط مخلوط آرگون و نیتروژن (P3) و نمونه آلیاژسازی شده با کروم و نیتروژن (P4) همانند جدول (۲) انجام گرفت.

برای بررسی ریزساختار لایه سطحی، پس از انجام متالوگرافی استاندارد، نمونه‌ها به مدت ۱۰-۸ ثانیه در محلول

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های استفاده شده در فرایند جوشکاری قوس تنگستن

کد نمونه	عملیات	جریان (آمپر)	سرعت (میلی متر بر دقیقه)	حرارت ورودی (کیلوژول بر سانتی متر)
P1	نمونه خام			
P2	ذوب سطحی نمونه خام در آرگون خالص	۱۰۰	۱۵۰	۴/۸
P3	ذوب سطحی در محیط حاوی نیتروژن			
P4	آلیاژسازی سطحی با کروم در محیط حاوی نیتروژن			

۳- نتایج و بحث

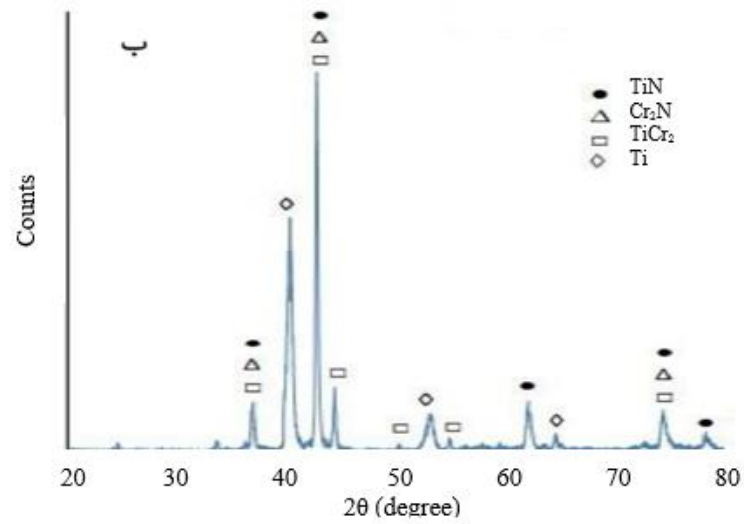
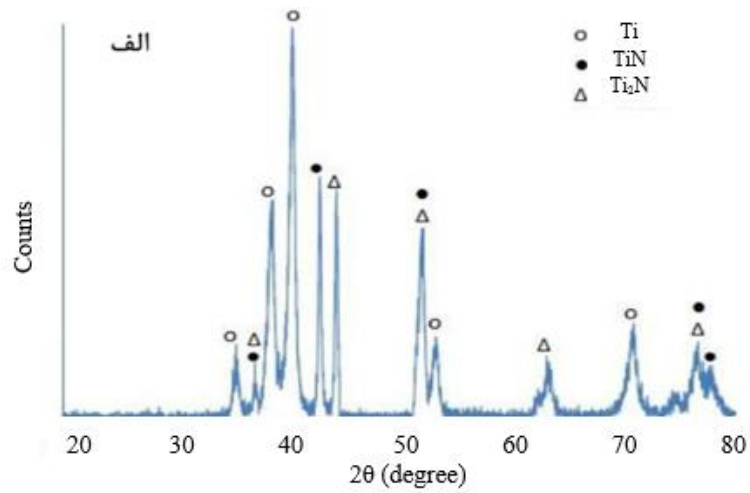
به منظور تشخیص لایه‌های سطحی حاصل شامل فازهای بین‌فلزی، آنالیز پراش پرتو ایکس انجام شد. بر اساس الگوهای پراش پرتو ایکس فازهای موجود در لایه ذوب سطحی شده برای نمونه‌های P3 و P4 جدول (۲) در شکل (۱) نشان داده شده است که حضور تیتانیم (زمینه) و ترکیبات TiN و Ti₂N در نمونه P3 و ترکیبات TiCr₂، TiN و Cr₂N در نمونه P4 را تأیید می‌کند. حرارت بالای ایجاد شده باعث شد تا لایه سطحی ذوب و با نیتروژن و کروم وارد واکنش شود. تشکیل این فازها را می‌توان این گونه توجیه کرد که سرعت سرمایش به قدری زیاد است که در حضور عنصر کروم به‌عنوان پایدارکننده فاز بتا و اتمسفر فعال نیتروژن ترکیبات بین فلزی فوق تشکیل شده است. بخشی از تیتانیم در عملیات آلیاژسازی شرکت نمی‌کند و در عملیات آلیاژسازی سطحی نمونه P4 به‌آسانی مشخص و قابل شناسایی است و در آزمون پراش پرتو ایکس، زاویه‌های پراش تیتانیم مشاهده می‌شود.

تصویر میکروسکوپی نوری از مقطع نمونه P4 جدول (۲) در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است منطقه آلیاژی تقریباً یکنواخت است. وجود حفرات گازی در منطقه آلیاژی به دلیل رطوبت اندک همراه چسب، و همچنین زمان بسیار کوتاه واکنش است که اجازه خروج به حفرات گازی را نمی‌دهد. وجود حفرات در حرارت‌های ورودی به نسبت پایین را می‌توان به تشکیل ناقص قوس بین زیرلایه و الکتروود نسبت داد [۱-۳].

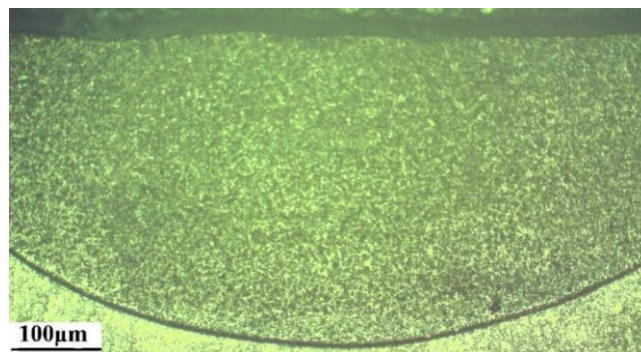
Kroll (حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر آب، ۳ میلی‌لیتر هیدروفلوئوریک اسید و ۶ میلی‌لیتر نیتریک اسید) حکاکی شده و با استفاده از میکروسکوپ نوری^۱ (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ Philips XL30 (SEM) مجهز به دستگاه پراش انرژی پرتو ایکس^۳ (EDS) مورد بررسی قرار گرفتند. برای شناسایی و بررسی فازهای تشکیل شده از پراش پرتو ایکس^۴ (XRD)، به وسیله دستگاه Bruker مدل D8DVABCE تحت ولتاژ ۴۰ کیلوولت و شدت جریان ۳۰ میلی آمپر با استفاده از پرتو تکفام CuK α (با طول موج ۱/۵۴ آنگستروم) و با اندازه گام ۰/۰۶ درجه انجام گرفت.

به منظور اندازه‌گیری سختی لایه‌های آلیاژی ایجاد شده، از یک دستگاه سختی سنج میکروسکوپی مدل Leitz با فرورونده از نوع ویکرز استفاده شد. از بار اعمالی ۳۰۰ گرم در این آزمایش استفاده شد.

رفتار سایشی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش سایش پین روی دیسک تحت بار ۳۰ نیوتن و مسافت ۱۰۰۰ متر و با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه، بررسی شد. در این آزمایش نمونه‌های سایشی، پین‌هایی با قطر پنج میلی‌متر و ارتفاع هشت میلی‌متر بودند که با استفاده از دستگاه برش سیم تهیه شدند. از دیسک‌های فولادی AISI52100 با قطر ۴۱ میلی‌متر و ارتفاع هشت میلی‌متر با سختی ۶۳HRC به‌عنوان جسم ساینده استفاده شد. پین و دیسک قبل و بعد از آزمایش سایش با دستگاه فراصوت و محلول استون چربی‌گیری و شسته شدند.



شکل ۱- الگوی پراش پرتو ایکس: الف) نمونه P3 و ب) نمونه P4



شکل ۲- تصویر میکروسکوپی نوری از نمونه P4

سطحی شده (P4) در شکل (۳) و جدول (۳) مشاهده می‌شود. نتایج حاکی از وجود عناصر نیتروژن و کروم در

نتایج حاصل از سنجش پراش انرژی پرتو ایکس از مناطق مختلف تشکیل شده از مقطع عرضی نمونه آلیاژسازی



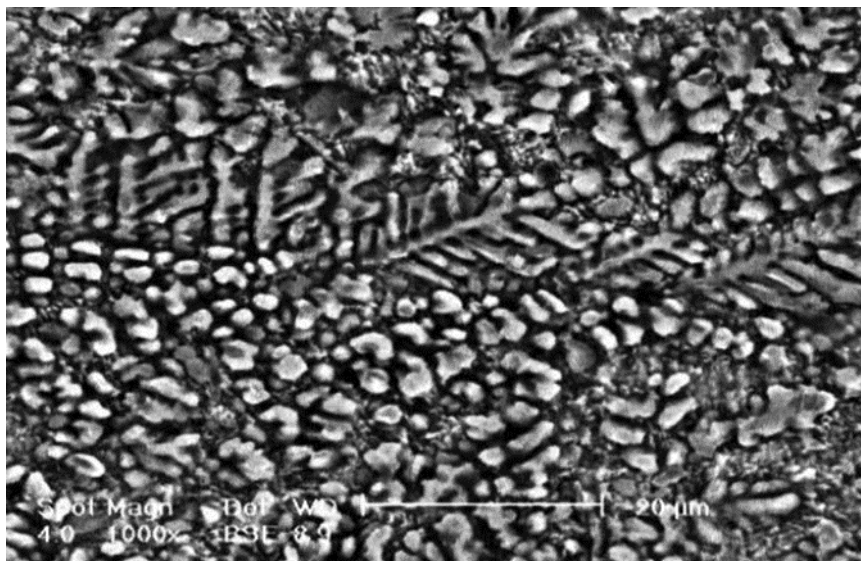
شکل ۳- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی دو منطقه A و B که تحت آزمون پراش انرژی پرتو ایکس قرار گرفتند (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۳- ترکیب شیمیایی مناطق مشخص شده در تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی شکل (۳)

Cr	N	V	Al	Ti	عناصر
درصد اتمی					
۱/۶۹	۱۹/۸۶	۱/۶۹	۲/۹۶	۷۳/۸	A
۰/۲۲	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۳۴	۹۹/۳۷	B

با فرورونده از نوع ویکرز استفاده شد. برای ریزسختی سنجی از بار اعمالی ۳۰۰ گرم به مدت ۳۰ ثانیه استفاده شد. آزمایش ریزسختی سنجی روی مقاطع لایه‌ها و در راستای عمود بر آنها صورت گرفت. بیشینه و میانگین نتایج میکروسختی چهار نمونه آزمایش جدول (۲) در جدول (۴) نشان داده شده است. در نمونه‌های P3 و P4، به‌طور عمده افزایش سختی را می‌توان به تشکیل TiN حاصل از واکنش نیتروژن با تیتانیم نسبت داد که موجب افزایش سختی سطحی و افزایش حدود چهار برابری سختی سطحی (بالای $HV_{0.3} 1000$) نسبت به آلیاژ پایه شد. علت افزایش سختی نمونه P4 نسبت به نمونه P3 را می‌توان به تشکیل حجم بیشتری از ترکیبات بین‌فلزی با

مناطق سفید و وجود تیتانیم در زمینه نسبتاً سیاه‌رنگ است. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ناحیه آلیاژی تهیه و در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در تصویر میکروسکوپی مشاهده می‌شود، ریزساختار لایه‌های سطحی حاصل، شامل منطقه هم‌محور و دندریتی شکل است. مناطق دندریتی و هم‌محور که با رنگ سفید در شکل (۴) مشخص و نمایان هستند، مناطق آلیاژی و مناطق با رنگ تیره همان ترکیب زمینه یا تیتانیم است. با توجه به الگوی پراش پرتو ایکس (شکل ۱)، ترکیبات بین‌فلزی تشکیل شده در این نمونه، شامل فازهای مختلف TiN ، $TiCr_2$ و Cr_2N است. به‌منظور اندازه‌گیری سختی لایه‌ها از دستگاه ریزسختی سنجی



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه آلیاژسازی شده با کروم و نیتروژن (P4)

جدول ۴- بیشینه و میانگین سختی نمونه‌ها برحسب سختی ویکرز

P4	P3	P2	P1	کد نمونه
۱۱۰۰	۱۰۰۰	۶۰۰	۲۵۰	بیشینه سختی (HV _{0.3})
۷۷۱	۷۲۳	۴۱۳	۲۲۴	میانگین سختی (HV _{0.3})

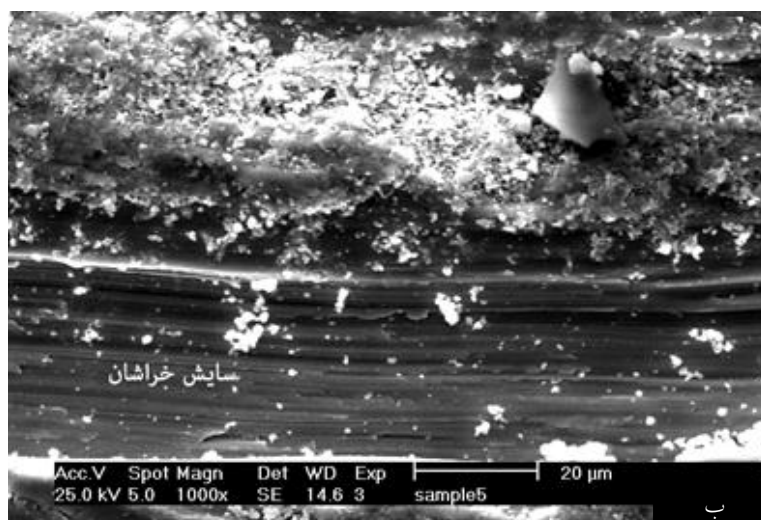
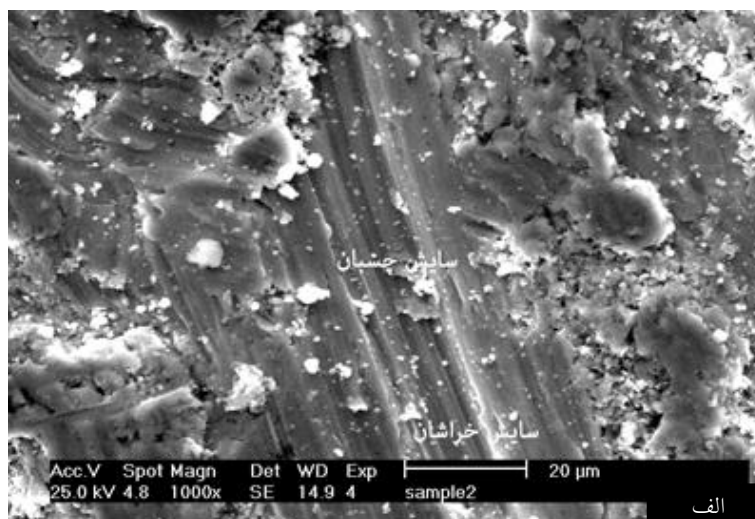
اتم‌سفر نیتروژنی و در حضور عنصر کروم و تشکیل ترکیبات بین‌فلزی تیتانیم با نیتروژن و کروم سبب این بهبود در مقاومت به سایش شده است. در شکل (۵-الف) برای نمونه P1، وجود کندگی‌ها، شکل شیارها و فرورفتگی‌ها نشان‌دهنده مکانیزم سایش خراشان و همچنین سایش چسبنده است. در شکل (۵-ب) برای نمونه P4 کندگی‌های شدید وجود ندارد که این موضوع را می‌توان به سختی بیشتر نمونه P4 و وجود ترکیبات آلیاژی سخت در زمینه مارتنزیتی دانست و مکانیزم سایش از نوع خراشان است. همانگونه که در شکل (۵-الف) قابل مشاهده می‌شود وجود بخش‌های جداشده درشت‌تر و دارای مورفولوژی صفحه‌ای شکل نشانگر جدایش به صورت پوسته‌ای (ناشی از تغییر فرم پلاستیک بزرگ در اثر چسبیدن و اتصال قوی‌تر در سطوح) است که مشخصه اصلی سایش از نوع چسبان را نشان می‌دهد. اما پدیده غالب و عمده در سطح، برای شکل (۵-ب)، به صورت برش‌های ایجاد شده و نفوذ ماده

فازهای مختلف با سختی زیاد مانند TiCr_2 و Cr_2N در نمونه P4 نسبت داد. افزایش سختی در نمونه ذوب سطحی (P2) به حدود HV_{0.3} ۶۰۰ می‌توان به تشکیل فاز مارتنزیت تیتانیم نسبت داد. در واقع افزایش حرارت زیاد و سپس سرعت سرمایش بالا باعث شده تا فاز مارتنزیت در تیتانیم ایجاد و باعث افزایش سختی به میزان قابل توجه بدون عملیات آلیاژسازی سطحی شود. در نواحی میانی لایه آلیاژی، سختی پایین‌تر است. دلیل این امر را می‌توان به ساختار سلولی و منطقه نزدیک به هم‌محور ناحیه آلیاژی شکل (۴) نسبت داد.

برای بررسی رفتار سایشی نمونه‌ها، آزمون سایش پین روی دیسک استفاده شد. نتایج آزمون سایش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، بار ۳۰ نیوتن و مسافت ۱۰۰۰ متر برای دو نمونه P1 و P4 (جدول (۲) در جدول (۵) و شکل (۵) حاکی از افزایش مقاومت به سایش حدود ۵/۹ برابری نمونه آلیاژسازی شده نسبت به نمونه خام است. انجام عملیات ذوب سطحی در

جدول ۵- مقدار کاهش وزن نمونه‌های P1 و P4 در آزمون سایش پین روی دیسک

P4	P1	کد نمونه
۰/۰۰۶۳	۰/۰۷۵۴	کاهش وزن پین (گرم)



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش پین تحت بار ۳۰ نیوتن و مسافت ۱۰۰۰ متر برای:

الف) نمونه P1 و ب) نمونه P4

بیشتری تولید می‌شود. به عبارتی سختی زیاد سطحی نمونه P4 اجازه کنده شدن لایه‌هایی از سطح توسط پین را نداده است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

سخت‌تر به درون ماده نرم‌تر و نیز حضور ذرات ریز ناشی از خراش‌های ایجاد شده، ظاهر شده است که مشخصه اصلی سایش نوع خراشان است.

اساساً نیتروژن به هنگام عملیات آلیاژسازی سطحی به مکان‌های بین‌نشین رفته و باعث استحکام بیشتر زمینه مارتنزیتی می‌شود [۲۱]. با ورود کروم به عملیات آلیاژسازی ترکیبات بین‌فلزی

افزایش یافت.

۳. عملیات آلیاژسازی سطحی با کروم در محیط نیتروژن و آرگون به تشکیل فازهای سخت TiN، TiCr₂ و Cr₂N در زمینه‌ای از فاز نسبتاً سخت تیتانیم منجر شد و سختی این لایه تا HV_{0.3} ۱۱۰۰ افزایش پیدا کرد.
۴. نرخ سایش نمونه آلیاژسازی شده با کروم در اتمسفر نیتروژن و آرگون تحت نیروی ۳۰ نیوتن، ۵/۹ برابر نسبت به آلیاژ پایه کاهش داشت.

۱. عملیات ذوب سطحی در اتمسفر آرگون خالص افزایش سختی از HV_{0.3} ۲۵۰ برای آلیاژ پایه تا HV_{0.3} ۶۰۰ برای لایه‌های ذوب سطحی شده، منجر شد. این افزایش سختی را می‌توان به تشکیل فاز مارتنزیت در لایه‌های ذوب سطحی نسبت داد.
۲. عملیات ذوب سطحی در محیط نیتروژن و آرگون به تشکیل فازهای سخت TiN و Ti₂N در زمینه‌ای از فاز مارتنزیت تیتانیم منجر شد و سختی این لایه تا حدود HV_{0.3} ۱۰۰۰

واژه‌نامه

- 1- optical microscope
- 2- scanning electron microscope

- 3- energy-dispersive X-ray spectroscopy
- 4- X-Ray diffraction

مراجع

1. Lisiecki, A., "Titanium Matrix Composite Ti/TiN Produced by Diode Laser Gas Nitriding", *Metals*, Vol. 5, No. 1, pp. 54-69, 2015.
2. Zhang, J., Li, X., Xu, D., and Yang, R., "Recent Progress in the Simulation of Microstructure Evolution in Titanium Alloys", *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 29, No. 3, pp. 295-304, 2019.
3. Gospodinov, D., Ferdinandov, N., and Dimitrov, S., "Classification, Properties and Application of Titanium and Its Alloys", *Proceedings of University of Ruse*, Vol. 55, No. 2, 2016.
4. Veiga, C., Davim, J. P., and Loureiro, A. J. R., "Properties and Applications of Titanium Alloys, a Brief Review", *Reviews on advanced materials science*, Vol. 32, No. 2, pp. 133-148, 2012.
5. Antunes, R. A., Salvador, C. A. F., and De Oliveira, M. C. L., "Materials Selection of Optimized Titanium Alloys for Aircraft Applications", *Materials Research*, Vol. 21, No. 2, pp. 1-9, 2018.
6. Koizumi, H., Takeuchi, Y., Imai, H., Kawai, T., and Yoneyama, T., "Application of Titanium and Titanium Alloys to Fixed Dental Prostheses", *Prosthodontic Research*, Vol. 63, pp. 266-270, 2019.
7. Lisiecki, A., and Piwnik, J., "Tribological Characteristic of Titanium Alloy Surface Layers Produced by Diode Laser Gas Nitriding", *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 61, No. 2, pp. 543-552, 2016.
8. Wegrzyn, T., Piwnik, J., Lazarz, B., and Hardys, D., "Main Micro-Jet Cooling Gases for Steel Welding", *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 58, pp. 555-557, 2013.
9. Crouch, I., *The Science of Armour Materials*, 1st Edition, Woodhead Publishing, 2016.
10. Faghani, G., and Nourouzi, S., "Hardness Promotion of Ti-6Al-4V Aerial Alloy Through Creation of Composite Layer by TIG Method", *Iranian Journal of Surface Science and Engineering*, Vol. 13, No. 31, pp. 93-106, 2017.
11. Lütjering, G. and Williams, J. C., *Titanium*, 2nd Edition, Springer, p. 442, 2007.
12. Nyakana, S., Fanning, J., and Boyer, R., "Quick Reference Guide for Titanium Alloys in the 00s", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 14, pp. 799-811, 2005.
13. Kalpakjian, S., and Schmid, S. R., *Manufacturing Engineering and Technology*, Seventh Edition, Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, p. 1180,, 2014.
14. Dong, H., *Surface Engineering of Light Alloys: Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys*, 1st Edition, Elsevier, p. 680, 2010.
15. Qin, L., Liu, C., Yang, K., and Tang, B., "Characteristics and Wear Performance of Borided Ti6Al4V Alloy Prepared by Double Glow Plasma Surface Alloying", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 225, pp. 92-96, 2013.
16. Makuch, N., Kulka, M., Dziarski, P., and Przystacki, D., "Laser Surface Alloying of Commercially Pure Titanium with Boron and Carbon", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 57, pp. 64-81, 2014.

17. Kamat, A. M., Copley, S. M., Segall, A. E., and Todd, J. A., "Laser-Sustained Plasma (LSP) Nitriding of Titanium, A Review", *Coatings*, Vol. 9, pp. 1-22, 2019.
18. Shamsipur, A., Kashani-Bozorg, S., and Zarei-Hanzaki, A., "Surface Modification of Titanium by Producing Ti/TiN Surface Composite Layers via FSP", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. 30, No. 6, pp. 550-557, 2017.
19. Hosmani, S. S., Kuppusami, P., and Goyal, R. K., *An Introduction to Surface Alloying of Metals*, Fourth Edition, Springer, Heidelberg, Germany, p. 70, 2014.
20. Dearnley, P. A., *Introduction to Surface Engineering*, 1st Edition, Cambridge University Press, New York, NY 10006, USA, p. 490, 2016.
21. Tavoosi, M., Arjmand S., and Adelimoghaddam, B., "Surface Alloying of Commercially Pure Titanium with Aluminium and Nitrogen using GTAW Processing", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 311, pp. 314-320, 2017.
22. Chen, X., Wu, G., Wang, R., Guo, W., Yang, J., Cao, S., Wang, Y., and Han, W., "Laser Nitriding of Titanium Alloy in the Atmosphere Environment", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 4843-4846, 2007.
23. Vaziri, A., Sohi, M. H., and Safaei, A., "Liquid Phase Surface Alloying of CP-Titanium with Aluminum in an Atmosphere of Argon and Nitrogen", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 18, pp. 3788-3794, 2012.