

بررسی اثر عملیات پیرسازی بر روی رفتار سایشی آلیاژ تیتانیوم

امیر قیصریان^۱، محمود عباسی^{۲*}

* نویسنده مسئول: m.abbasi@aut.ac.ir

واژه‌های کلیدی

آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V، پیرسازی،
مقاومت به سایش، آنیل میانی

تاریخ ارسال: ۹۵/۰۱/۱۶

تاریخ بازنگری: ۹۵/۰۲/۲۵

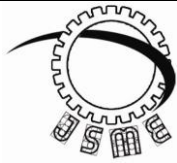
تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۲۴

چکیده

با توجه به ویژگی‌های مورد توجه آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V از قبیل نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت به خوردگی مناسب، این آلیاژ استفاده زیادی در صنایع نظامی و پزشکی دارد. در این تحقیق، به بررسی اثر عملیات پیرسازی بر ریزساختار و رفتار سایشی آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از آزمون سایش پین بر دیسک پرداخته شد. نمونه‌هایی از آلیاژ مورد مطالعه در دو دمای مختلف، ۹۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد مورد عملیات انحلالی قرار گرفتند و سپس نمونه‌ها سرد و پیرسازی شدند. بعضی از نمونه‌ها پیش از پیرسازی، در دمای ۷۰۰ °C آنیل شدند. نتایج نشان داد که رفتار سایشی آلیاژ تیتانیوم مورد مطالعه از قانون آرچارد^۳ تبعیت نکرد و پیرسازی علیرغم افزایش سختی، سبب کاهش مقاومت به سایش شد. همچنین مشاهده شد که انجام آنیل میانی پیش از پیرسازی اگرچه سبب تسریع تجزیه فاز مارتنزیت تشکیل شده در مرحله کوئنچ و تشکیل ذرات فاز آلفا (α_2) شد و در نتیجه سختی پس از پیرسازی را افزایش داد اما در نهایت کاهش مقاومت به سایش را سبب شد. بررسی میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) و پراش اشعه ایکس (XRD) نشان داد که مهمترین دلیل کاهش مقاومت به سایش با انجام پیرسازی، حضور فاز سخت آلفا (α_2) در کنار فاز نرم بتا در ریزساختار نمونه پیرسازی شده بود.

۱- کارشناس ارشد، شناسایی و انتخاب مواد مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۲- استادیار دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.



Journal of
Solid Mechanics in
Engineering

Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



Investigation into Aging Effect on Wear Behavior of Titanium Alloy

Amir Gheisarian¹, Mahmood Abasi^{2,*}

*Corresponding Author: m.abbasi@aut.ac.ir

Abstract:

Ti-6Al-4V titanium alloy has great application in medicine and military industries due to its capabilities, namely high strength to weight ratio and corrosion resistance. In the current research, the effect of aging treatment on microstructure and wear behavior of Ti-6Al-4V titanium alloy was investigated. Pin on disk wear test was applied to assess the wear behavior. Specimens were first solution treated at 950°C and 1050°C and then were quenched and aged. Some specimens were annealed before aging at 700°C. The results showed that aging treatment resulted in the hardness increase and the wear resistance decrease. It was also observed that annealing treatment before aging, enhanced the martensite decomposition and the formation of α_2 particles, and correspondingly resulted in more hardness and lower wear resistance. Scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) analyses confirmed that presence of hard phase α_2 particles within soft beta phase was the main reason for wear resistance decrease.

Key words:

Ti-6Al-4V
Aging
Wear resistance
Annealing

1- MSC, Faculty of Engineering, Department of Materials Engineering, Kashan University, Kashan, Iran.

2- Assistant Prof., Faculty of Engineering, Department of Materials Engineering, Kashan University, Kashan, Iran.

۱- مقدمه

آلیاژهای تیتانیوم، از جمله آلیاژهای سبک هستند که به دلیل خواص ویژه خود از جمله نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت به خوردگی خوب، کاربرد زیادی در صنایع نظامی، هوافضا، ساخت تجهیزات پزشکی و ایمپلنت‌ها دارند [۱-۳]. در میان آلیاژهای مختلف تیتانیوم، آلیاژ Ti-6Al-4V به دلیل ویژگی‌های مناسب از جمله قابلیت عملیات حرارتی، بیشترین استفاده را در بین آلیاژهای مختلف تیتانیوم دارد و حدود ۶۰٪ کل محصولات تیتانیومی را تشکیل می‌دهد [۴]. تحقیقات زیادی در ارتباط با اثرات فرآیندهای مختلف عملیات حرارتی از جمله آنیل، سردسازی و پیرسازی بر روی میکروساختار و خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V از جمله استحکام تسلیم، نرمی، شکل پذیری و مقاومت خوردگی صورت گرفته است [۵-۸]. با این وجود، بررسی اثرات عملیات حرارتی بر روی رفتار سایشی این آلیاژ کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. یانگ^۱ و همکاران [۹] رفتار سایشی آلیاژ Ti-6Al-4V را در هوا و خلاء مورد بررسی قرار داده و مشاهده نمودند که در مقادیر مختلف سرعت و نیرو، سرعت سایش در هوا بیشتر از خلاء است. همچنین آنها دریافتند که سایش در هوا ترکیبی از سایش خراشان، اکسیداسیون و لایه‌ای شدن است در حالیکه سایش در خلاء، تنها به سبب تغییر فرم شدید در مناطق زیرسطحی می‌باشد. اوزیوریک^۲ و همکاران [۱۰]، رفتار سایشی سایشی تیتانیم خالص و آلیاژ Ti-6Al-4V تولید شده به روش آلیاژ سازی مکانیکی را مورد ارزیابی قرار دادند و مشاهده نمودند که مقدار کاهش وزن آلیاژ Ti-6Al-4V بیشتر از تیتانیم خالص بود. استرافلینی^۳ و همکاران [۱۱]، رفتار سایشی آلیاژ

Ti-6Al-4V را مورد بررسی قرار داده و مشاهده نمودند که در سرعت سایش کم، سایش تحت کنترل اکسیداسیون بود و با افزایش سرعت سایش، مکانیزم سایش به سمت لایه‌ای شدن پیش رفت. آنها همچنین مشاهده کردند که با افزایش سرعت و نیروی سایش، دمای سطح افزوده شده و سطح نمونه نرم و به تبع آن، سرعت کرنش پلاستیک و سرعت سایش افزایش یافت.

بورگیولی^۴ و همکاران [۱۲] رفتار سایشی آلیاژ Ti-6Al-4V را مورد بررسی قرار دادند. آنها با بررسی ذرات سایشی، دریافتند که پودرهای تیتانیومی با مورفولوژی لایه‌ای و ذرات اکسیدی ریز از مشخصه‌های پودرهای سایش است. از طرفی نتایج بررسی آنها نشان داد که با افزایش سرعت حرکت پین، میزان اکسیداسیون کاسته شده و مکانیزم سایش به لایه‌ای شدن تغییر یافت. فیدان^۵ و همکاران [۱۳]، تاثیر عملیات حرارتی بر رفتار سایشی آلیاژ Ti-6Al-4V را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که پیرسازی بر مقاومت سایشی ماده اثر معکوس داشته و مقاومت سایشی نمونه با افزایش سختی افت می‌یابد. آنها همچنین دریافتند که آنیل انحلالی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد و پیرسازی در دمای ۵۴۰ درجه سانتیگراد نسبت به آنیل انحلالی در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و پیرسازی در دمای ۵۴۰ درجه سانتیگراد باعث افت بیشتر مقاومت سایشی نمونه شد. آنها علت این پدیده را به جزء حجمی بیشتر فاز مارتنزیت تجزیه شده به رسوبات ریز بتا پس از پیرسازی برای نمونه آنیل انحلالی شده در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد، نسبت دادند که افزایش سختی را به همراه داشت ولی باعث افت مقاومت سایشی نمونه شد. این در حالی است که رسوبات فاز بتا ایجاد شده در اثر پیرسازی پس از آنیل

¹ Young² Özyürek³ Straffelini⁴ Borgioli⁵ Fidan

شده و سپس سریع سرد و پیرسازی شدند. تعدادی از نمونه‌ها، پیش از پیرسازی در دمای 700°C آنیل میانی شدند. در شکل ۱، چرخه عملیات حرارتی انجام شده برای نمونه‌ها ارائه شده است. در این شکل، مشاهده می‌شود که با توجه به توضیحات ارائه شده، ۶ دسته نمونه تهیه شده است. به منظور اطمینان از صحت نتایج، ۳ نمونه برای هر دسته مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مطالعه تغییرات ریزساختاری از روش استاندارد [۱۶] جهت متالوگرافی نمونه‌ها استفاده شد. بدین منظور نمونه‌ها ابتدا با استفاده از سمباده کاربید سیلیسیم تا سمباده ۲۴۰۰، سمباده کاری و پس از آن نمونه‌ها با پودر آلومینا با اندازه دانه های 0.3 میکرون پولیش شدند. پس از این مرحله به منظور حذف آلودگی‌های سطحی، نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در آب مقطر تحت آلتراسونیک قرار گرفته و نهایتاً بوسیله محلول کروم با ترکیب (۱۰ میلی لیتر هیدروفلئوریک اسید، ۱۰ میلی لیتر نیتریک اسید و ۸۰ میلی لیتر آب مقطر) اچ شدند. در پایان بررسی‌های ریزساختاری بوسیله میکروسکوپ‌های نوری و الکترون روبشی انجام شد.

انحلالی در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد کمتر بود. لذا میزان سختی کمتر و مقاومت به سایش بیشتر حاصل شد. مولیناری^۱ و همکاران [۱۴]، رفتار تریبولوژیکی ضعیف تیتانیم خالص و آلیاژ Ti- 6Al- 4V را به سبب عدم توانایی این مواد در تشکیل فیلم اکسیدی مقاوم حین سایش دانستند. زوم گهر^۲ [۱۵] نتیجه گیری نمود که در اثر حرکت ذرات فاز سخت بر روی یک سطح فلزی نرم، سایش خراشان در اثر جدا شدن ماده از سطح رخ می‌دهد. او بیان کرد که، عامل اصلی کنترل کننده سایش خراشان، سختی ماده است. او همچنین دریافت که اصولاً رفتار سایشی در مواد با ساختار چند فاز به نسبت به مواد تک فاز، ضعیف‌تر است زیرا فاز سخت موجود در این مواد به راحتی از فاز زمینه کنده شده و خود باعث سایش بیشتر زمینه می‌شود. زوم گهر [۱۵]، مشاهده کرد که در اثر حرکت پین با سختی بالا بر سطح یک ماده دوفازی، ذرات فاز دوم ریز به راحتی کنده شده و ذرات درشت برش می‌خورند.

در تحقیق حاضر، تاثیر عملیات حرارتی آنیل میانی و پیرسازی بر ریزساختار، سختی و رفتار سایشی آلیاژ Ti- 6Al- 4V مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات وزن نمونه و ضریب اصطکاک در اثر سایش اندازه‌گیری و شکل ذرات حاصل از سایش و همچنین سطح سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (SEM) بررسی شد.

۲- مواد و روش انجام آزمایش

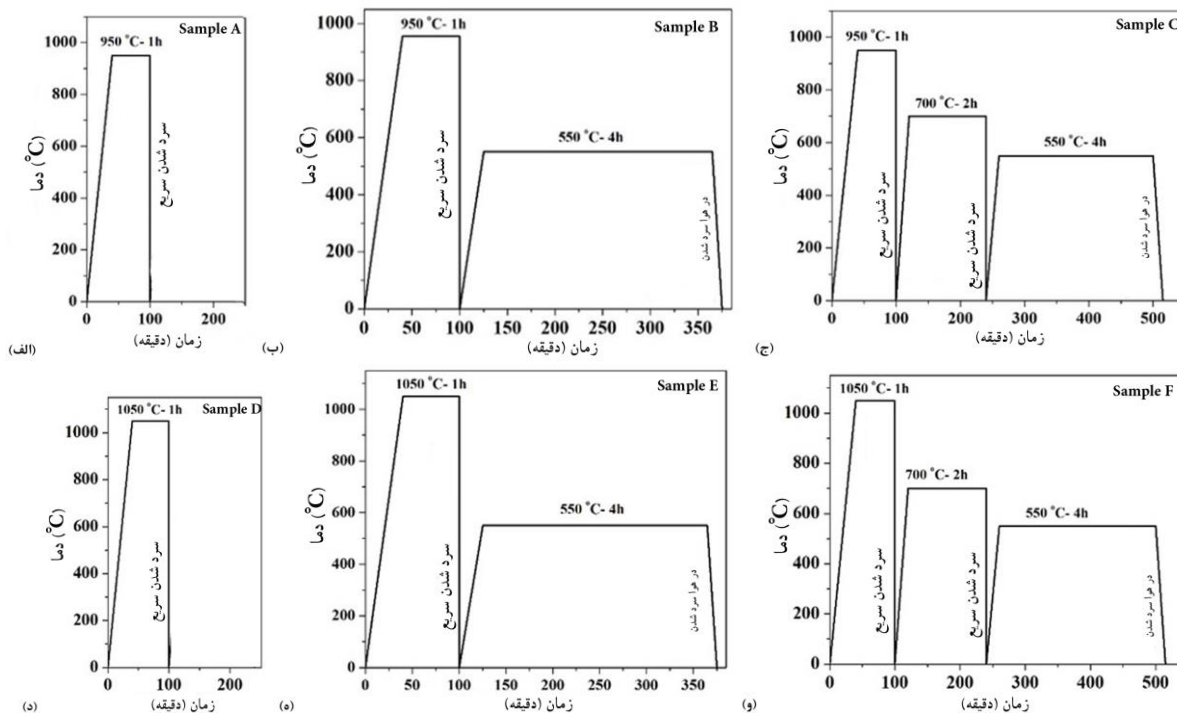
در جدول ۱، ترکیب شیمیایی ورق آلیاژ تیتانیوم مورد مطالعه با ضخامت ۱ میلی‌متر نمایش داده شده است. با انجام آزمون کالریمتری، دمای استحاله آلیاژ 995°C تعیین شد. نمونه‌ها در دو دمای مختلف ۹۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد، آنیل انحلالی

¹ Molinari

² Zum Gahr

جدول (۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V مورد مطالعه.

عنصر	Al	V	Cu	Mo	Sn	Nb	Pd	Fe	Ti
درصد وزنی	۵/۸۳	۳/۸۶	۰/۱۵	۰/۴۳	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۱۵	مابقی

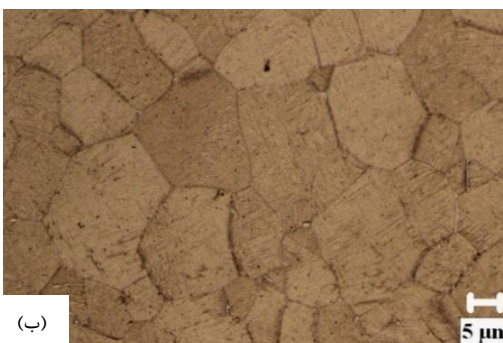
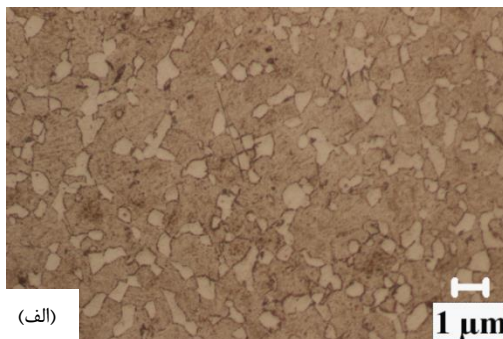


شکل (۱) سیکل‌های حرارتی به کار برده شده برای نمونه‌های مختلف که با نمادهای A، B، C، D، E و F نمایش داده شده‌اند.

آزمون سایش با استفاده از روش پین بر دیسک بر اساس استاندارد ASTM G99-05 [۱۷] انجام شد. بدین منظور در ابتدا نمونه‌هایی از جنس آلیاژ مزبور به شکل دیسک به قطر ۵ سانتیمتر به وسیله برش وایرکات آماده شد و پس از آن سیکل‌های عملیات حرارتی نشان داده شده در شکل ۱ روی نمونه‌های مربوطه اعمال شد. فولاد بلبرینگ با سختی ۶۵ راکول سی به عنوان پین استفاده شد. پس از عملیات حرارتی و پیش از انجام آزمون، نمونه‌ها آماده‌سازی شدند. بدین منظور نمونه‌ها با روش‌های استاندارد با سمباده‌های کاربید سیلیسیم تا سمباده ۱۲۰۰ سمباده زده شده و پس از آن به مدت ۱۵ دقیقه در محلول استون تحت امواج آلتراسونیک قرار گرفتند. با توجه به مراجع [۱۲ و ۱۴]، طی آزمون سایش مقدار نیرو ۱۰N،

بمنظور اندازه‌گیری میزان سختی، از روش ویکرز با نیروی ۳۰ Kg استفاده شد. مدت زمان اعمال نیرو ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شده و برای هر نمونه حداقل ۵ مرتبه میزان سختی اندازه‌گیری شد. توزیع سختی در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه میکروسختی سنجی با قابلیت روبش سطح مورد بررسی قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده قرار گرفته، قابل برنامه‌ریزی بوده و توانایی روبش سطح و تعیین سختی نقاط در فواصل مشخص از یکدیگر را دارد. اطلاعات سختی جمع‌آوری شده، در پایان پردازش شده و نقشه سختی سطحی استخراج می‌شود. اندازه‌گیری سختی در فواصل ۱۰ میکرونی انجام شد. نیروی اعمالی برای کلیه نمونه‌ها ۱N و زمان اعمال نیرو ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

شکل پراکنده شده‌اند و ریزساختار نمونه D، شامل سوزن‌های مارتنزیت (فاز آلفا پریم) محاط شده در داخل دانه‌های فاز بتا می‌باشد. این موضوع را می‌توان با توجه به دمای استحاله آلیاژ مورد مطالعه (995°C) توجیه نمود. آنیل نمونه در دمای 950°C به معنای حضور در ناحیه دوفازی (آلفا+بتا) بوده و آنیل در دمای 1050°C به معنای انحلال سازی در ناحیه تک فاز بتا می‌باشد. با انجام سردسازی سریع، فاز بتا به فاز مارتنزیت (آلفا پریم) تبدیل می‌شود [۴]. لذا پس از سردسازی برای نمونه A، حضور ذرات فاز آلفا اولیه در زمینه مارتنزیتی و برای نمونه D، ساختاری کاملاً مارتنزیتی انتظار می‌رود که با مشاهدات نمایش داده شده در شکل ۲، مطابقت دارد. در شکل ۴ ریزساختار نمونه‌های B و E که پس از آنیل انحلالی و سردسازی، پیرسازی شده‌اند، نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات کوچکی در ساختار مارتنزیت پس از پیرسازی مشاهده می‌شود.



شکل (۳) ریزساختار نمونه آنیل انحلالی - کوئنچ و پیرسازی شده (الف): نمونه B و (ب): نمونه E.

سرعت حرکت پین 0.1 m/sec و مسافت حرکت پین بر سطح، 1 کیلومتر در نظر گرفته شد. در حین انجام آزمون میزان کاهش وزن نمونه‌ها در هر 100 متر ، بوسیله ترازو با دقت 0.0001 گرم اندازه گیری شد. پس از انجام آزمون، به منظور آنالیز و مشخص کردن مکانیزم سایش، علاوه بر انجام آزمون پراش اشعه ایکس بر روی پودرهای حاصل از آزمون سایش، مورفولوژی پودرها و سطوح سایش نیز بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

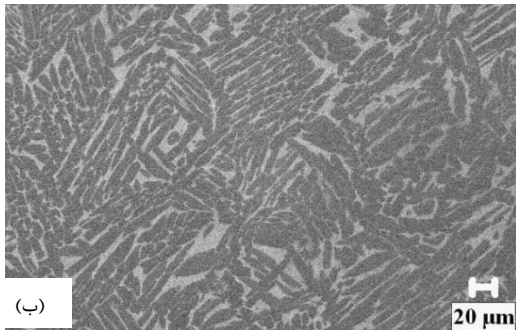


شکل (۲) ریزساختار نمونه‌های آنیل انحلالی و کوئنچ شده، (الف): نمونه آنیل انحلالی شده در دمای 950°C و کوئنچ شده (نمونه A) (ب): نمونه آنیل انحلالی در دمای 1050°C و کوئنچ شده (نمونه D).

۳- نتایج

۳-۱- بررسی ریزساختار

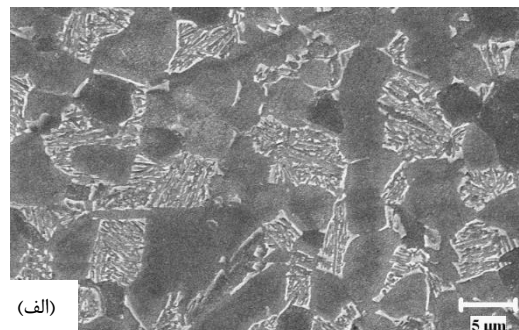
ریزساختار نمونه‌های آنیل انحلالی و کوئنچ شده، شامل نمونه های A و D، در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود ریزساختار نمونه A (شکل ۲ الف) شامل دانه های فاز آلفای اولیه می‌باشد که در زمینه مارتنزیتی و سوزنی



شکل (۴) تصاویر SEM نمونه‌های آنیل انحلالی-کوئنچ-آنیل میانی و پیرسازی شده، (الف): نمونه C و (ب): نمونه F.

همان طور که بیان شد حضور مقدار جزئی فاز بتا در شکل ۴ الف (نمونه C) قابل تشخیص است. فروز^۱ [۱۸] بیان نمود که با تشکیل فاز آلفای اولیه در ساختار آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V، عناصر تقویت کننده فاز بتا از فاز آلفا به درون زمینه پس زده می شوند و درصد عناصر پایدار کننده فاز بتا در زمینه افزایش می یابد. نتیجه این امر، کاهش دمای شروع استحاله مارتنزیتی و پایداری بیشتر فاز بتا در دماهای پائین تر و حضور فاز بتای باقی مانده پس از سردسازی می باشد. مطالعه دقیق میکروسکوپی فاز بتای باقی مانده در ساختار نمونه C، تشکیل رسوبات تیغه ای فاز آلفا را نمایش داد (شکل ۵). تشکیل این رسوبات تیغه ای در نمونه های پیرسازی شده یکی از منابع افزایش استحکام و سختی، برشمرده شده است [۱۵ و ۱۸]. تصویر ریزساختار فاز بتای باقی مانده در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود رسوبات سوزنی شکل فاز آلفا در اثر افزایش عملیات پیرسازی در داخل دانه های فاز بتا نمایان شده اند.

در شکل ۳، مشاهده می شود که ریزساختار نمونه های B و E تقریباً مشابه نمونه های A و E می باشند با این تفاوت که در هر دو نمونه از مقدار سوزنی بودن فاز مارتنزیت کاسته شده است که نمایانگر تجزیه محدود مارتنزیت به فازهای لایه ای آلفا و بتا می باشد. در شکل ۴، تصاویر SEM نمونه های مورد بررسی که پیش از پیرسازی، آنیل میانی شده اند، شامل نمونه های C و F (شکل ۱)، نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۴، مشاهده می شود که در اثر عملیات پیرسازی پس از آنیل میانی، فاز مارتنزیت موجود در ساختار نمونه های C و F تجزیه شده است و تشکیل ساختار لایه ای مربوط به تشکیل فازهای آلفا و بتا از مارتنزیت مشهود می باشد. به عبارتی، آنیل میانی به تجزیه فاز مارتنزیت در نمونه های C و F کمک کرده است. تجزیه مارتنزیت به فازهای بتا و آلفا با مورفولوژی کشیده و سوزنی، مشخصه تصاویر ارائه شده در شکل ۴ می باشد. در اثر تجزیه مارتنزیت، ابتدا فاز آلفا ایجاد می شود که مورفولوژی کشیده و نسبتاً سوزنی دارد. در اثر کم شدن عناصر پایدار کننده فاز آلفا در نواحی نزدیک به آلفای ایجاد شده، رسوبات فاز بتا ایجاد می شوند [۷]. همچنین در شکل ۴ الف، حضور فاز آلفای اولیه به صورت دانه های هم محور به همراه مقدار جزئی فاز بتای باقی مانده (نواحی سفید رنگ کوچک) ناشی از عملیات سردسازی مشاهده می شود. بررسی دقیق فاز آلفای اولیه با استفاده از میکروسکوپ SEM، تشکیل و حضور ذرات نانومتری فاز α_2 با ترکیب Ti_3Al را نشان داد (شکل ۵) که به عنوان یکی از عوامل استحکام دهی طی فرآیند پیرسازی برشمرده شده است [۱۳].



¹ Froes



شکل (۶) رسوبات سوزنی شکل فاز آلفا داخل بتا باقی مانده.

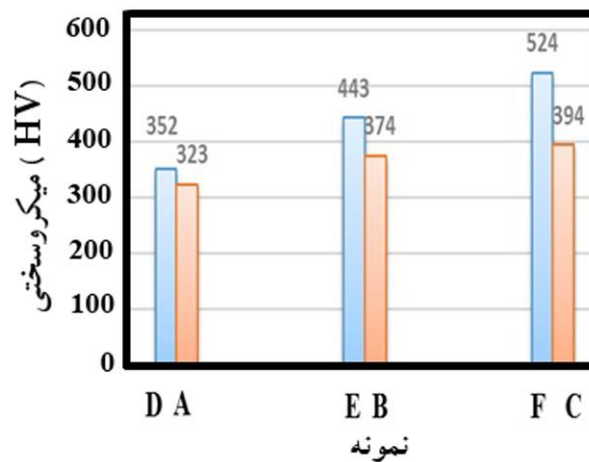


شکل (۵) تصویر SEM ذرات رسوب نانومتری فاز α_2 در دانه های فاز آلفا اولیه موجود در نمونه C.

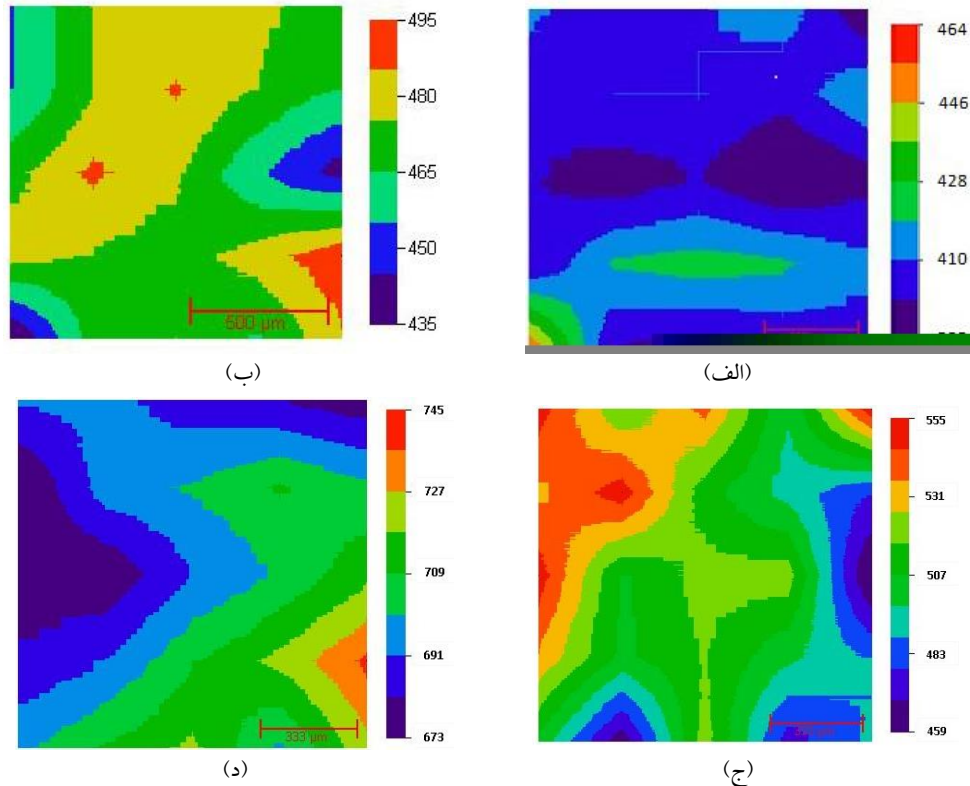
با انجام پیرسازی، مارتنزیت تجزیه شده و به فازهای آلفا و بتا تجزیه می شود، که در درون فاز آلفا، رسوبات فاز α_2 و در داخل فاز بتای باقی مانده، رسوبات تیغه ای فاز آلفا ایجاد می شوند که هر دو از عوامل افزایش سختی محسوب می شوند [۱۹-۲۰]. با انجام آنیل میانی، از آنجا که تجزیه فاز مارتنزیت بیشتری صورت می گیرد لذا انتظار افزایش سختی بیشتری می رود که با مشاهدات در شکل ۷ منطبق می باشد. افزایش بیشتر سختی نمونه های آنیل انحلالی شده در دمای 1050°C نسبت به نمونه های آنیل انحلالی شده در دمای 950°C را می توان به حضور فاز مارتنزیت بیشتر در این نمونه ها نسبت داد. همان طور که می دانیم مارتنزیت در ساختار تیتانیوم فازی سخت و ترد می باشد [۱۳ و ۱۸].

۳-۲- سختی سنجی

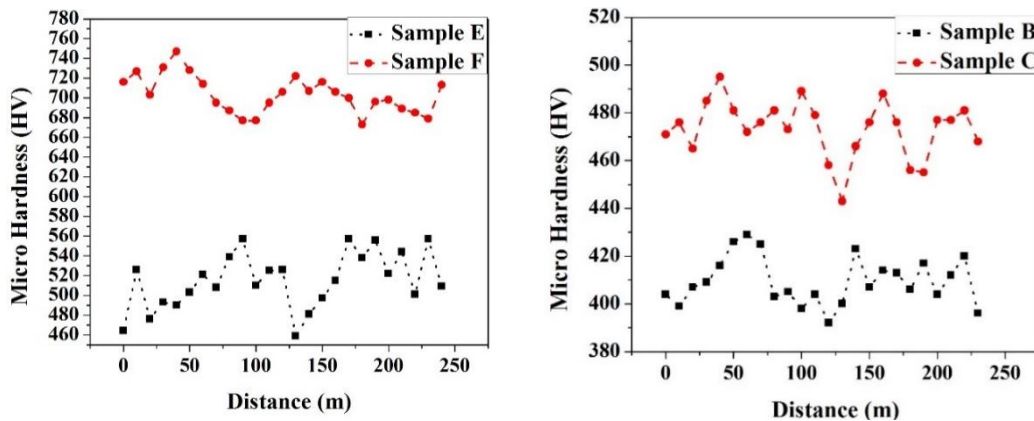
در شکل ۷، مقادیر سختی مربوط به نمونه های مختلف عملیات حرارتی و پیرسازی شده نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۷، مشاهده می شود که سختی نمونه های پیرسازی شده بیشتر از نمونه های آنیل انحلالی و سریع سرد شده می باشد و همچنین انجام آنیل میانی سبب افزایش سختی پس از پیرسازی می شود. این موضوع با توجه به مشاهدات صورت گرفته در بخش ریزساختار قابل تفسیر می باشد.



شکل (۷) نتایج آزمون سختی سنجی ماکرو برحسب ویکرز



شکل (۸) توزیع سختی سطحی در نمونه‌های (الف): B، (ب): C، (ج): E و (د): F.



شکل (۹) توزیع سختی خطی در نمونه‌های پیرسازی شده.

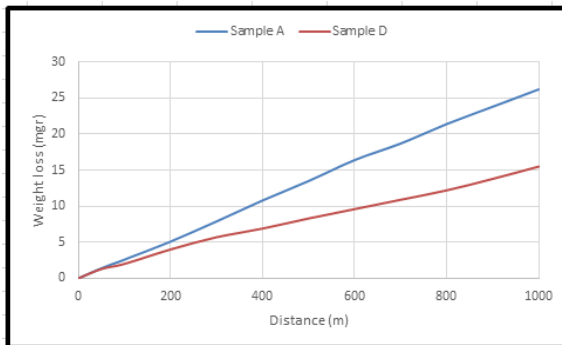
بیان شد به سبب تجزیه بیشتر فاز مارتنزیت در اثر آنیل میانی و تشکیل فازهای سخت و سوزنی α_2 و رسوبات تیغه ای فاز آلفا به ترتیب در فاز آلفا و فاز بتای باقی مانده در اثر پیرسازی می باشد. همچنین مشاهده می شود، نمونه‌های آنیل انحلالی شده در بالای دمای استحاله، در کل سختی بالاتری نسبت به نمونه‌های آنیل انحلالی شده در زیر دمای استحاله دارند.

تصاویر مربوط به توزیع سختی سطحی و خطی مربوط به نمونه های آنیل انحلالی-کوئنچ-آنیل میانی-پیرسازی شده و آنیل انحلالی-کوئنچ-پیرسازی شده به ترتیب در اشکال ۸ و ۹ ارائه شده است. با توجه به اشکال ۸ و ۹ مشاهده می شود، نمونه‌هایی که پیش از پیرسازی تحت عملیات آنیل میانی قرار گرفته‌اند سختی بالاتری یافته‌اند که این امر همانطور که پیش از این نیز

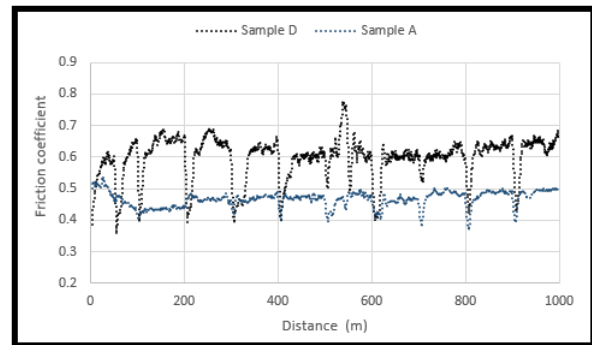
حالی که نمونه A، دارای فاز آلفا اولیه در ساختار است که اطراف آن بوسیله فاز بتای باقی مانده و مارتنزیت احاطه شده است. بررسی ها نشان داده است که میکروساختار ناهمگن و اختلاف سختی بین فازهای مختلف (فاز بتای نرم و فاز آلفای سخت) از عوامل تضعیف رفتار سایشی می باشد [۲۱].

۳-۳- نتایج آزمون سایش

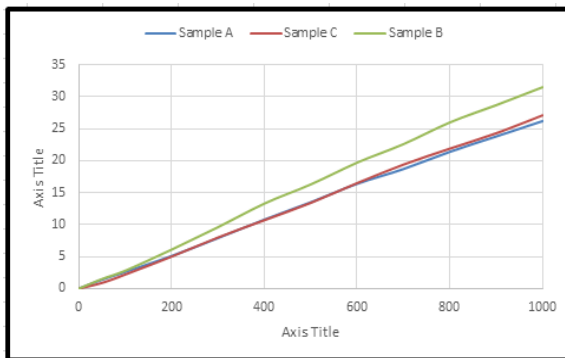
نتایج مربوط به آزمون سایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به اشکال ۱۰ الف و ب مشاهده می شود که نمونه آنیل انحلالی شده در دمای دو فاز مقاومت به سایش کمتری نسبت به نمونه آنیل انحلالی شده در دمای تک فاز بتا دارد. علت این موضوع را می توان بر این اساس توضیح داد که نمونه D دارای ساختار یکنواخت مارتنزیتی می باشد در



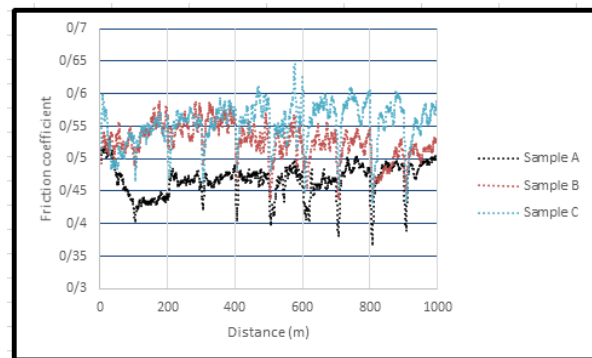
(ب)



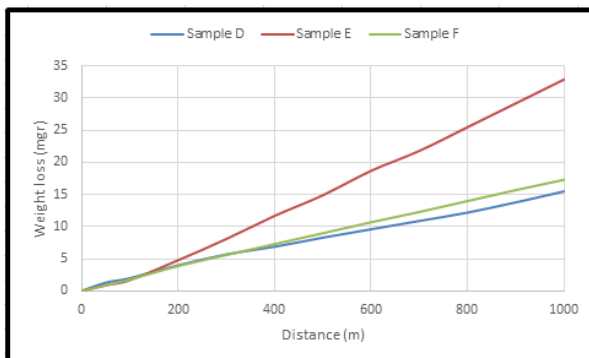
(الف)



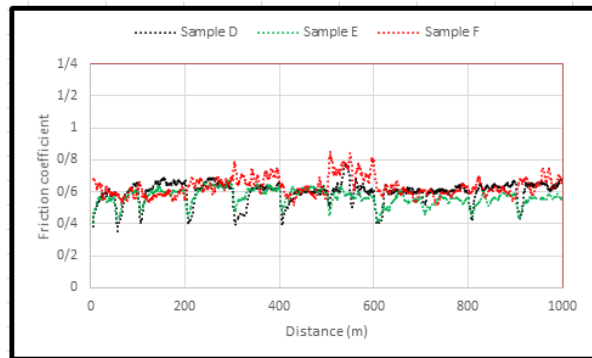
(د)



(ج)

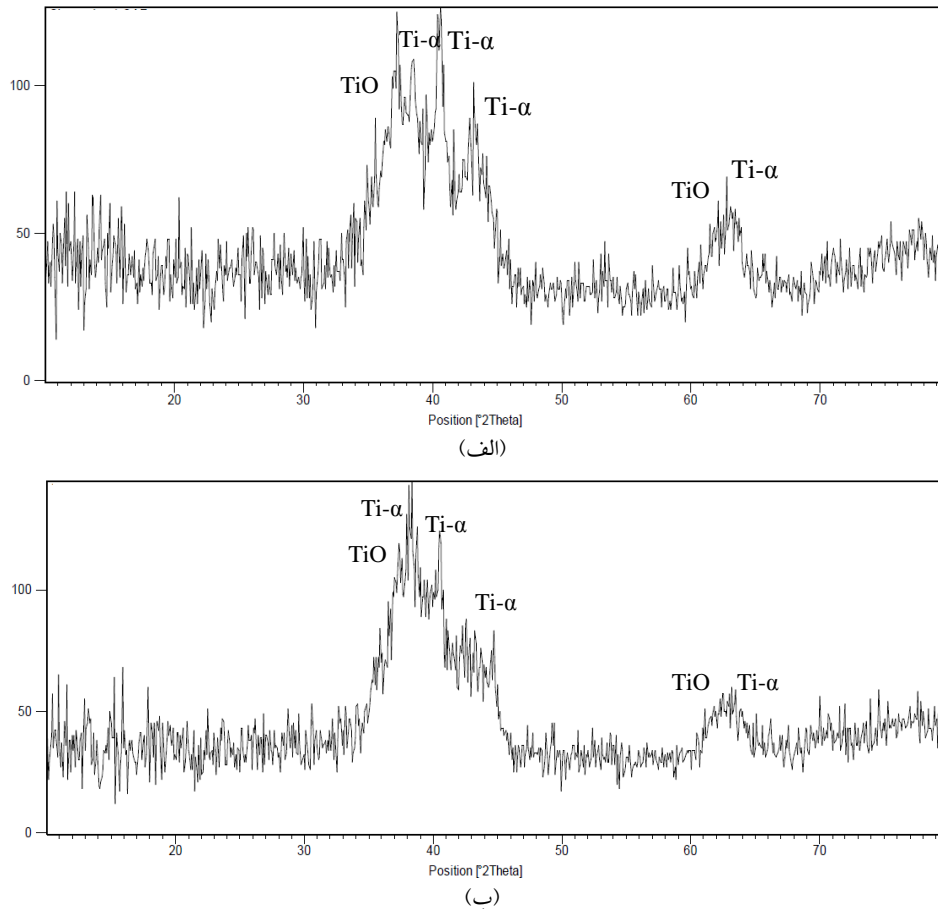


(و)



(ه)

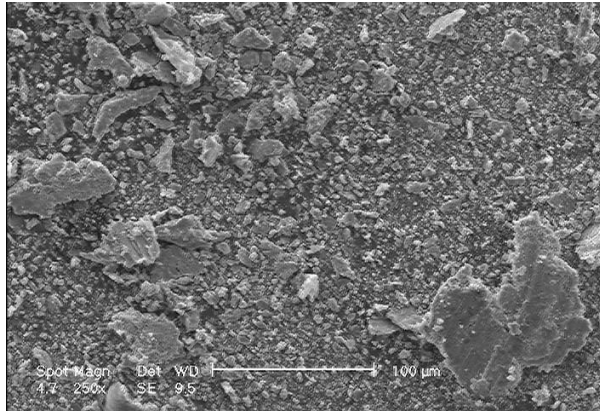
شکل (۱۰) نمودارهای مربوط به کاهش وزن و ضریب اصطکاک نمونه‌ها با سیکل های عملیات حرارتی متفاوت.



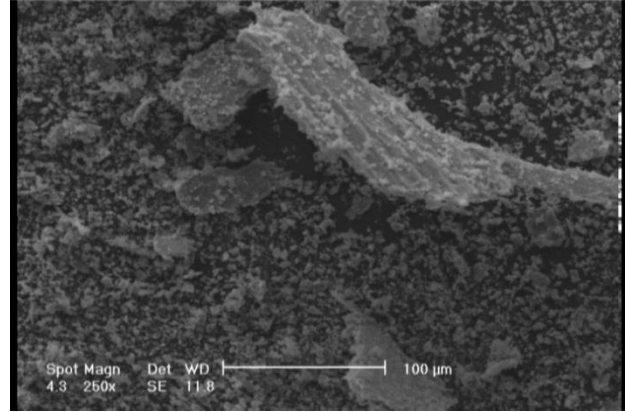
شکل (۱۱) نتایج آزمون پراش اشعه ایکس پودرها. (الف): نمونه C، (ب): نمونه F.

بحرانی برسد. در این لحظه سطح ماده در ناحیه ترک به صورت لایه‌ای، جدا می‌شود. جهانمیری [۲۶] همچنین جدایش ذرات پودر از سطح سایش را متوجه جوانه زنی عیوب زیرسطحی دانست. آشی [۲۸] همچنین دریافت که حرکت پین و فعال شدن یک سیستم لغزش باعث تجمع نابجایی‌ها حول فاز سخت یا ذرات رسوب می‌شود که در ادامه، فعال شدن سیستم‌های لغزش ثانویه و برخورد نابجایی‌های ناشی از این سیستم با نابجایی‌های اولیه منجر به ایجاد ناحیه‌ای تحت تنش‌های کششی زیاد می‌شود. این تنش کششی، شرایط جوانه زنی ترک را فراهم می‌آورد. در ادامه، حرکت سیکلی پین روی سطح منجر به رشد ترک به موازات سطح می‌شود و با رسیدن ترک به اندازه مشخص، لایه از سطح جدا می‌شود.

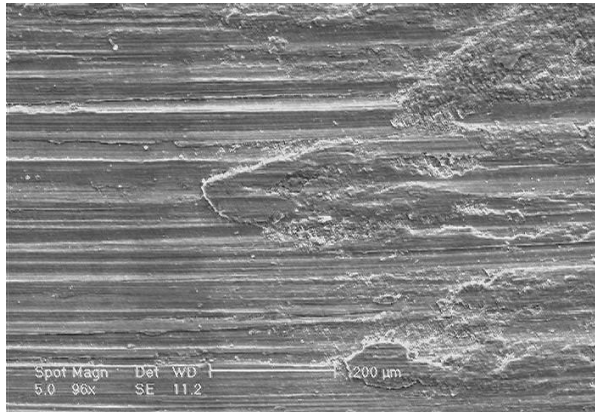
همچنین در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که انجام پیرسازی که افزایش سختی را به ترتیب برای نمونه‌های A، B و C به همراه دارد، سبب کاهش مقاومت به سایش و افزایش کاهش وزن طی فرآیند سایش شده است. که این موضوع با تئوری آرچارد [۲۲] که افزایش سختی سبب افزایش مقاومت به سایش می‌باشد، همخوانی ندارد. البته باید توجه داشت که نقض تئوری آرچارد، موضوع جدیدی نیست [۱۳ و ۱۵]. سو [۲۷] با بررسی دقیق حرکت پین بر سطح نمونه سایش، دریافت که در خلال حرکت، ناصافی‌های سطح تغییر فرم پلاستیک موضعی را متحمل می‌شوند که با لغزش بیشتر، میزان این تغییر فرم پلاستیک افزایش می‌یابد. زمانیکه میزان کرنش به مقدار بحرانی رسید، ترک‌ها زیر سطح، جوانه‌زنی کرده و به موازات سطح انتشار می‌یابند تا اندازه ترک به مقدار



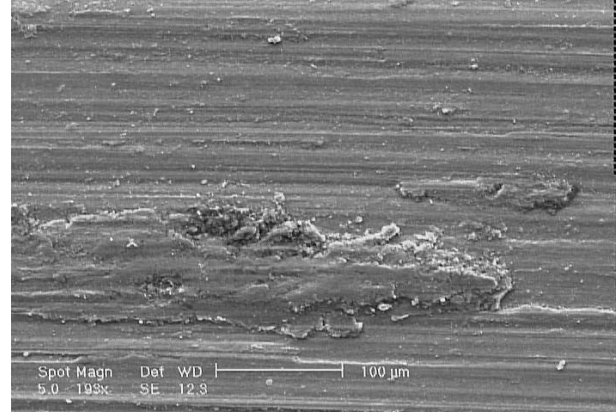
(ب)



(الف)

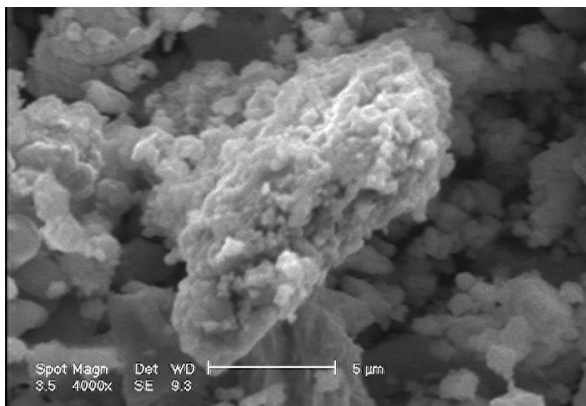


(د)

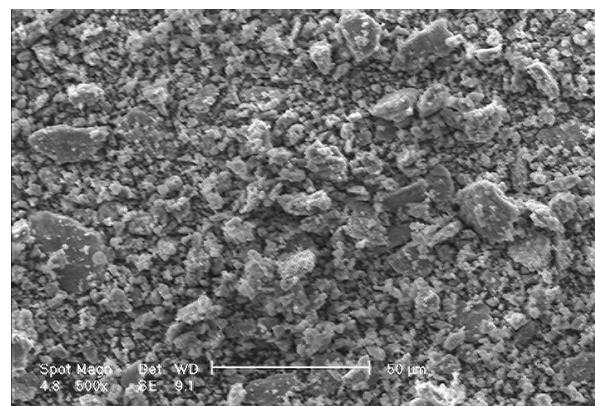


(ج)

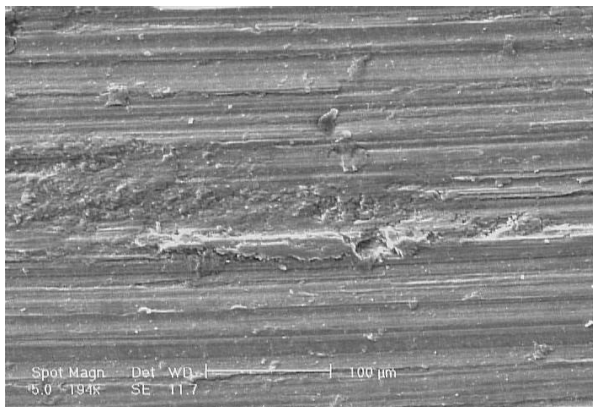
شکل (۱۲) تصاویر SEM، پودرها و سطوح سایش نمونه C.



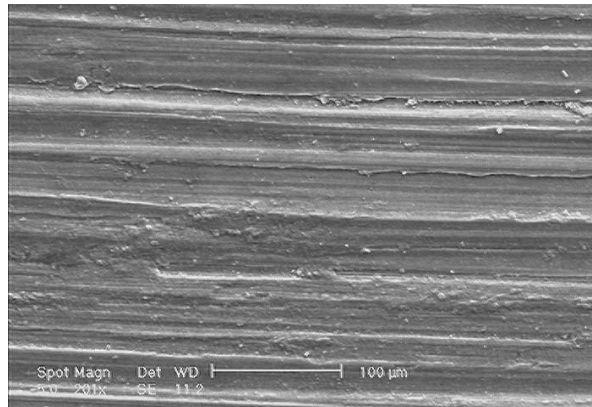
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۱۳) تصاویر SEM، پودرها و سطوح سایش نمونه F.

میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتیجه در اشکال ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است.

تصاویر میکروسکوپی سطوح سایش، نمایشگر سایش خراشان^۳ می باشند که البته در نواحی موضعی، سایش حالت چسبان^۴ به خود گرفته است. تصاویر میکروسکوپی ذرات پودر، نمایشگر حضور ذرات کوچک پودر ناشی از سایش خراشان در کنار ذرات نسبتاً بزرگ پودر ناشی از سایش چسبان می باشد. با توجه به نتایج آزمون پراش اشعه ایکس، می توان این گونه نتیجه گرفت که این ذرات پودر از جنس تیتانیوم آلفا و اکسیدهای تیتانیم هستند.

با لحاظ موارد اشاره شده، می توان اینگونه بیان داشت که با انجام پیرسازی، ذرات فاز سخت آلفا در کنار فاز بتا شکل می گیرند. فاز بتا، فازی نرم است که در اثر حرکت پین روی سطح، دچار تغییر فرم پلاستیک شده و تجمع نابجایی‌ها در فصل مشترک این فاز با فاز آلفا شکل می گیرد. در ادامه با حرکت بیشتر پین، ترک‌ها در ناحیه فصل مشترک شکل گرفته و رشد می یابند و در نهایت به جدا شدن ذرات فاز

هدک^۱ [۲۳] و ساهو^۲ [۲۴] دریافتند که علت کاهش وزن بیشتر نمونه‌های پیرسازی شده، رسوبات ریز ایجاد شده حین پیرسازی می‌باشند. حضور این رسوبات ریز سبب می‌شود که در حین تغییر فرم پلاستیک ناشی از حرکت پین، سطح نمونه در اثر حرکت پین، براحتی برش خورده و مقاومت سایشی ماده کاهش یابد. هدک [۲۳]، همچنین متوجه شد که هرچه این رسوبات ریزتر باشند، راحت‌تر همراه با زمینه کنده می‌شوند. در واقع اثر کاهش مقاومت به سایش در این شرایط تابع فصل مشترک ذرات و زمینه بوده و فصل مشترک ضعیف منجر به کاهش مقاومت به سایش می‌شود. هرچه مقدار فصل مشترک افزایش یابد (حضور رسوبات ریزتر)، مقاومت به سایش کاهش بیشتری می‌یابد.

نتایج پراش اشعه ایکس مربوط به آنالیز پودرهای سایش نمونه های C و F در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در هر دو نمونه پیک‌های مربوط به اکسید تیتانیوم و فاز تیتانیوم آلفا ظاهر شده‌اند. به منظور پیش بینی مکانیزم سایش، مورفولوژی پودرها و سطوح سایش به کمک

³ Abrasive wear⁴ Adhesive wear¹ Hadke² Sahoo

نتایج نشان داد که ناهمگنی در ساختار و تشکیل فاز سخت آلفا در کنار فاز نرم بتا از عوامل اصلی کاهش مقاومت به سایش در آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V پس از پیرسازی می‌باشد. همچنین مشاهده شد که:

۱- پیرسازی اگرچه به دلیل تجزیه فاز مارتنزیت و تشکیل سوزنهای فاز آلفا و ذرات رسوب α_2 سبب افزایش سختی می‌شود، اما کاهش مقاومت به سایش و افزایش کاهش وزن پس از سایش را به همراه دارد.

۲- انجام آنیل میانی پیش از پیرسازی، سبب تسریع تجزیه فاز مارتنزیت شده و در نتیجه افزایش سختی و کاهش مقاومت به سایش را سبب می‌شود.

مراجع

- [1] Tsuji, N., Tanaka, S. and Takasugi, T., Effect of combined plasma-carburizing and deep-rolling on notch fatigue property of Ti-6Al-4V alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 499, 2009, pp. 482-488.
- [2] Guan, R.G., et al., Effect of microstructure on deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy during compressing process, *Materials & Design*, Vol. 36, 2012, pp. 796-803.
- [3] López, J.G., et al., Effect of small temperature variations on the tensile behaviour of Ti-6Al-4V, *Procedia Engineering*, Vol. 10, 2011, pp. 2330-2335.
- [4] Matsumoto, H., et al., Room-temperature ductility of Ti-6Al-4V alloy with α' martensite microstructure, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, 2011, pp. 1512-1520.
- [5] Semiatin, S. L., Bieler, T.R., The effect of alpha platelet thickness on plastic flow during hot working of Ti-6Al-4V with a transformed microstructure, *Acta Materialia*, Vol. 49, 2001, pp. 3565-3573.
- [6] Adamus, J., Lacki, P., Forming of the titanium elements by bending, *Computational Materials Science*, Vol. 50, 2011, pp. 1305-1309.
- [7] Shidid, D.P., et al., Study of effect of process parameters on titanium sheet metal bending using Nd: YAG laser, *Optics & Laser Technology*, Vol. 47, 2013, pp. 242-247.
- [8] Knezevic, M., et al., Modeling bending of α -titanium with embedded polycrystal plasticity in implicit finite elements, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 564, 2013, pp. 116-126.
- [9] Young, L., et al., Dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy in air and vacuum, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 13, 2003, pp. 1137-1140.

آلفا می‌انجامند. با توجه به توضیحات ارائه شده، رسوبات مکان‌های جوانه زنی ترک می‌باشند، که این امر با سایش بیشتر نمونه‌های پیرسازی شده تطابق دارد.

نتیجه گیری

در این تحقیق، به بررسی اثر فرآیند پیرسازی بر روی میکروساختار و رفتار سایشی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V پرداخته شد. نمونه‌ها پس از آنیل انحلالی تحت پیرسازی در دمای 550°C به مدت ۴ ساعت قرار گرفتند. همچنین در مورد بعضی نمونه‌ها، پیش از عملیات پیرسازی، نمونه‌ها تحت آنیل میانی در دمای 700°C به مدت یک ساعت قرار گرفتند.

- [10] Özyürek, D., Tekeli, S., Wear properties of titanium and Ti6Al4V titanium alloy by mechanical milling, *High Temperature Materials and Processes*, Vol. 30, 2011, pp. 175-180.
- [11] Straffelini, G., Molinari, A., Dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy as influenced by the counterface and sliding conditions, *Wear*, Vol. 236, 1999, pp. 328-338.
- [12] Borgioli, F., et al., Improvement of wear resistance of Ti-6Al-4V alloy by means of thermal oxidation, *Materials Letters*, Vol. 59, 2005, pp. 2159-2162.
- [13] Fidan, S., et al., Effect of heat treatment on erosive wear behaviour of Ti6Al4V alloy, *Materials Science and Technology*, Vol. 29, 2013, pp. 1088-1094.
- [14] Molinari, A., et al., Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy, *Wear*, Vol. 208, 1997, pp. 105-112.
- [15] Zum Gahr, K.H., Wear by hard particles, *Tribology International*, Vol. 31, 1998, pp. 587-596.
- [16] ASTM E3-01, Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.
- [17] ASTM G99-05(2010), Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [18] Froes, F.H., Titanium: Physical metallurgy, processing, and applications, ASM International, 2015, pp. 145.
- [19] Yu, H., et al., Influence of heat treatment on hot-rolled sheet forming of Ti6Al4V alloy, International Conference on Materials Science and Application (ICMSA 2015), Thailand, 2015, pp. 65-72.
- [20] Gu, K., et al., Effect of cryogenic treatment and aging treatment on the tensile properties and

- microstructure of Ti6Al4V alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 584, 2013, pp. 170-176.
- [21] Cvijović-Alagić, I., et al., Influence of the heat treatment on the tribological characteristics of the Ti-based alloy for biomedical applications, *Tribology in Industry*, Vol. 31, 2009, pp. 17-22.
- [22] Archard, J., Contact and rubbing of flat surfaces, *Journal of Applied Physics*, Vol. 24, 1953, pp. 981-988.
- [23] Hadke, S., et al., Microstructure evolution and abrasive wear behavior of Ti-6Al-4V alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 24, 2015, pp. 3969-3981.
- [24] Sahoo, R., Jha, B.B., Sahoo, T.K., Dry sliding wear behaviour of Ti-6Al-4V alloy consisting of bimodal microstructure, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 67, 2014, pp. 239-245.
- [25] Suh, N.P., Sridharan, P., Relationship between the coefficient of friction and the wear rate of metals, *Wear*, Vol. 34, 1975, pp. 291-299.
- [26] Jahanmir, S., Suh, N.P., Mechanics of subsurface void nucleation in delamination wear, *Wear*, Vol. 44, 1977, pp. 17-38.
- [27] Suh, N.P., The delamination theory of wear, *Wear*, Vol. 25, 1973, pp. 111-124.
- [28] Ashby, M.F., Work hardening of dispersion-hardened crystals, *Philosophical Magazine*, Vol. 14, 1966, pp. 1157-1178.