ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(03):167-177

Effect of Compressive Residual Stress on Wear Resistance of IGT25 + Gas Turbine Compressor Blades Made of 1.4923 Steel

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Khiabani A.[1],
Nasri M.[2],
Shajari Y.[3],
Seyedraoufi Z.S.[4] *

How to cite this article
Khiabani A, Nasri M, Shajari Y, Seyedraoufi Z S. Effect of Compressive Residual Stress on Wear Resistance of IGT25 + Gas Turbine Compressor Blades Made of 1.4923 steel. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(03):167-177.

[1]Department of Metallurgy and Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University Karaj, Iran
[2]Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
[3]Materials and Energy Research Center, Department of Ceramics, Karaj, Iran
[4] Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Alborz, Iran.
[4] Advanced Materials Engineering Research Center, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

Correspondence
Address: Department of Metallurgy and Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University Karaj, Iran

z.seyedraoufi@kiau.ac.ir

Article History
Received: Macrh 13, 2021
Accepted: July 07, 2021
ePublished: January 14, 2022

ABSTRACT

1.4923 stainless steel is one of the options for producing Iranian gas turbine (IGT25) compressor blades and upgrading IGT25 +., as well as the importance of wear resistance in turbine parts and the small number of studies in the field of wear as a destructive mechanism of turbine parts, in this research the effect of residual stress caused by shot peening on the wear resistance of steel 1.4923 was investigated. To create the compressive residual stress, shot peening operations were used at 5, 10, 15 and 20 minutes. Microstructural studies by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) showed that with increasing shot peening time, the thickness of the plastic deformation area increases so that the plastic deformation area can be divided into three plastic deformation areas. Severe, ordinary plastic deformation and the area affected by plastic deformation. Calculations on the results of X-ray diffraction (XRD) showed that with increasing shot peening time, the amount of compressive residual stress increases to 694 MPa. With increasing compressive residual stress on the surface, the wear resistance of the samples increased up to 90% due to the increase in the density of dislocations and grain refining. Also, the investigation of worn surfaces by SEM showed that the wear mechanism in the samples is oxide adhesive wear and increasing the residual stress of the samples causes the transfer of the wear regime to mild wear abrasion with the appearance of crater areas.

Keywords Compressor Blade of Gas Turbine Wear, Residual Stress, Shot Peening

CITATION LINKS

[1] Prediction of fatigue performance in gas turbine... [2] Effects of surfaces nanocrystallization... [3] Effect of Nb addition to Ti-bearing... [4] Residual stresses and martensite transformation... [5] Thermal treatment effect on tribological... [6] Stress corrosion behavior of 12Cr martensite steel... [7] ASM Metals Handbook, Surface Engineering. [8] Effect of shot peening on surface residual stress... [9] Effective X-ray elastic constant measurement... [10] Effect of carbide distribution... [11] Sliding wear behaviour of surface... [12] Effect of heat treatment on microstructure... [13] Potential of martensitic... [14] Effect of Nb addition to Ti-bearing super martensitic... [15] Failure analysis of warm stamping of magnesium alloy... [16] Surface modification of oilfield alloys... [17] Effects of water cavitation peening... [18] Influence of severe shot peening on the surface state... [19] Evolution of a laser shock peened residual stress... [20] Effect of laser shock peening on fatigue life... [21] The effect of shot peening ... [22] Accuracy of X-ray diffraction... [23] X-ray diffraction residual stress techniques. [24] Investigation of surface residual stress profile... [25] X-ray stress measurements in the institute of aviation... [26] Effect of shot peening on the residual stress... [27] Effects of low intensity shot peening... [28] Residual stress-affected diffusion... [29] Dislocation-based study on the influences of shot peening... [30] The effect of shot peening on stress corrosion... [31] On modeling hydrogen-induced... [32] Surface textural features... [33] Dose to the contralateral breast from radiotherapy and risk... [34] Effects of different shot peening... [35] Elements of X-ray Diffraction. [36] Microstructural parameters ... [37] Surface nanocrystallization ... [38] Investigation of shot peening effect ... [39] Green reduction of graphene oxide... [40] Improved fatigue strength of nanostructured... [41] Effect of plastic deformation and damage development... [42] Evaluation of Abrasive Wear... [43] Wear behavior and subsurface layer work hardening... [44] Optimization of shot peening effective parameters... [45] Effectiveness of link and path ... [46] Comparing the Influence of Residual Stresses... [47] Influence of residual stress...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

اثر تنش پسماند فشاری بر مقاومت به سایش پره‌های کمپرسور توربین گاز +IGT25 از جنس فولاد 1.4923

آرش خیابانی
گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران
مهدی نصری
گروه مهندسی مکانیک، طراحی کاربردی، دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین (ره)، قزوین، ایران
یزدان شجری
پژوهشگاه مواد و انرژي، پژوهشکده سرامیک، کرج، ایران
زهراسادات سیدرئوفی*
گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران
مرکز تحقیقات مهندسی مواد پیشرفته، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

چکیده
فولاد ضد زنگ 1.4923 یکی از گزینه‌های ساخت پره‌های کمپرسور توربین گاز ایرانی و درحال ارتقاء +IGT25 است. از آنجا که سایش در قطعات توربینی یک مکانیزم مخرب بوده و در سایه دیگر مکانیزم‌های آسیب زا قرار می‌گیرد و مقالات بسیار کمی در این حوزه موجود است، در این تحقیق نقش تنش پسماند ناشی از ساچمه کوبی بر مقاومت در برابر سایش فولاد 1.4923 بررسی شد. برای ایجاد تنش پسماند فشاری از عملیات ساچمه کوبی در زمان‌های ۵،۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه استفاده شد. بررسی‌های ریزساختاری به وسیله میکروسکوپ‌های نوری (OM) و الکترونی روبشی (SEM) نشان دادند که با افزایش زمان ساچمه‌کوبی، ضخامت ناحیه تغییر فرم پلاستیک افزایش می‌یابد؛ طوری که ناحیه تغییر فرم پلاستیک را می‌توان به سه ناحیه تغییر فرم پلاستیک شدید، تغییر فرم پلاستیک معمولی و ناحیه متاثر از تغییر فرم پلاستیک تقسیم بندی نمود. محاسبات روی نتایج تفرق پرتو ایکس (XRD) نشان داد که با افزایش زمان ساچمه کوبی، میزان تنش پسماند فشاری تا ۶۹۴ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. با افزایش تنش پسماند فشاری در سطح نیز، مقاومت به سایش نمونه‌ها با توجه به افزایش چگالی نابجایی‌ها و خرد شدن دانه‌ها، تا میزان ۹۰ درصد افزایش یافت. بررسی سطوح سایشی به وسیله SEM نشان داد که مکانیزم سایشی در نمونه‌ها سایش چسبان اکسیدی است و افزایش تنش پسماند نمونه‌ها سبب انتقال رژیم سایشی به سایش خراشان ملایم همراه با پدیدار شدن مناطق کندگی شد.

کلیدواژه‌ها: پره کمپرسور توربین گازی، سایش، تنش پسماند، ساچمه کوبی، تغییر فرم پلاستیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۶
*نویسنده مسئول: z.seyedraoufi@kiau.ac.ir

۱- مقدمه
قطعات توربین‌های گاز تحت تاثیر عوامل مخرب، شرایط پیچیده و بحرانی سرویس دهی مانند دما و تنش‌های تناوبی بالا هستند. از این رو اجرای صحیح مراحل ساخت و بازدیدهای دوره‌ای از آنها در نحوه عملکرد و طول عمر این قطعات اثرگذار بوده و از اهمیت بسزایی نیز برخوردار است. در قسمت کمپرسور توربین‌های گاز، فشار هوای ورودی به توربین مرحله به مرحله افزایش می‌یابد تا جایی که برای احتراق و عملکرد مناسب در قسمت داغ توربین آماده شود.

پره‌های کمپرسور توربین گازی در اکثر موارد از طریق فورج و یا ماشینکاری بلوک فورج شده تولید می‌شوند که این موضوع سبب باقی ماندن تنش پسماند در این پره‌ها می‌گردد. تنش پسماند عموما از طریق تحت الشعاع قرار دادن مقاومت در برابر خوردگی، خواص مکانیکی و تحمل ضربه عملکرد قطعه را دچار تغییر می‌کند[1]. از طرف دیگر، در زمان اورهال نیز پره‌ها به وسیله پاشش ماسه مورد تمیزکاری قرار می‌گیرند که این موضوع نیز باعث ایجاد تنش پسماند فشاری در پره کمپرسور می‌شود. در برخی از ردیف‌ها، پره کمپرسور تحت پوشش دهی توسط پوشش‌های مقاوم در برابر فرسایش مانند: SSA12، پوشش‌های نانو ساختار و مرتبه‌ای نیتریدی، پوشش‌های بر پایه فاز مکس و پوشش‌های نیتروکربوره و نیتروکسیدی قرار می‌گیرند. اولین اقدام برای اجرای این پوشش‌ها تمیزکاری و ایجاد زبری مناسب به وسیله پاشش ماسه و یا ساچمه است که خود منشاء ایجاد تنش پسماند است[2].

اخیراً تقاضا برای استفاده از مواد با پایداری فازی- حرارتی بالا، استحکام مکانیکی بالا همراه با مقاومت در برابر خوردگی در زمینه‌های مختلف مهندسی مانند نیروگاه‌های آبی، توربین‌های آبی، خطوط انتقال سیال و به خصوص توربین‌های گازی رو به افزایش است[3]. فولادهای ضد زنگ مارتنزیتی و یا آستنیتی برای ساخت این قطعات حساس، انتخاب مناسبی هستند. در مواردی که استحکام بالا مورد نیاز است فولادهای مارتنزیتی و در مواقعی که مقاومت به خوردگی مورد توجه است، فولادهای آستنیتی در کانون توجه قرار می‌گیرند[4,5]. برای کاربرد این فولادها در توربین گاز عوامل دیگری همچون مقاومت در برابر خستگی، قابلیت جوشکاری و تعمیر پذیری، سختی مناسب و کربن پایین نیز از اهمیت بالایی برخوردار است[4-9]. این ساختار توسط کاربیدهای مرزدانه‌ای و درون دانه‌ای نیز استحکام بخشی می‌شود که خواص مکانیکی دما بالا را افزایش می‌دهد[10].

یکی از مکانیزم‌های زوال قطعات توربین گازی، سایش تحت ذره و عبور گاز است، اما این مکانیزم عموما در کنار عواملی همچون خزش، خستگی، خوردگی داغ، اکسیداسیون و تحولات ساختاری مورد توجه قرار نمی‌گیرد. از آنجا که پاشش ذرات سبب خردایش دانه‌ها و تغییر فرم پلاستیک از طریق کار سرد مکانیکی و افزایش سختی می‌شود، بنابراین استحکام و سختی سطح افزایش می‌یابد و این مهم می‌تواند در افزایش مقاومت در برابر سایش و فرسایش موثر باشد. عموما پس از پاشش، تنش پسماند موضعی فشاری در قطعه ایجاد می‌گردد[11-14]. اخیرا، از روش‌های جدید کوبش سطحی جهت تغییر فرم پلاستیک سطحی، ایجاد تنش پسماند فشاری و اصلاح سطح مانند شلیک لیزر، شلیک امواج صوتی،

شلیک آب و ایجاد حفرات ناشی از آن، ضربه شدید پاششی و ساچمه کوبی عادی استفاده می‌شود[15-19]. در فرآیند شلیک لیزر، پرتو لیزر پالسی با پهنای پالس نانو ثانیه و شدت بالا به سطح نمونه تابیده می‌شود. تبخیر سریع سطح تابش شده به وسیله پرتو لیزر، منجر به تشکیل پلاسما از گاز نیمه یونیزه در سطح می‌شود. پلاسما انرژی لیزر را جذب کرده و باعث ایجاد فشار زیاد در سطح نمونه می‌شود. فشار از طریق امواج شوک به حجم ماده منتقل می‌شود[19]. زمانی که فشار بیشتر از استحکام شود باعث تغییر شکل پلاستیک درسطح قطعه می‌شود. استفاده از امواج التراسونیک موتورهای الکترومکانیک و اعمال آنها روی قطعه، باعث تغییرشکل پلاستیک سطحی و افزایش خواص سطحی می شود[16] اعمال ضربه‌های پی در پی به دلیل انفجار حفرات آب، باعث تغییر شکل پلاستیک سطحی می‌شود که حفرات فرو رفته تنش پسماند فشاری سطحی ایجاد می‌کند[17].

روش‌های دیگری مانند ضربه شدید ذرات نیز وجود دارد که هر کدام از این روش‌ها برای یک کاربرد خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند و هر کدام به نحوی منجر به بهبود خستگی، سایش و مقاومت به خوردگی می‌شوند. به عنوان مثال پرتوریس و همکاران با کوبش لیزر روی قطعات توربین گازی، مقاومت به خستگی را تا ۵۵۳ درصد بهبود دادند[20]. پاناگوتاس و همکاران با شات پینینگ روی قطعات توربین گازی به این نتیجه رسیدند که شات پینینگ باعث بهبود خواص تریبولوژی و افزایش مقاومت به سایش می شود[21]. در این تحقیق به دلیل در دسترس بودن و ارزان بودن از فرآیند شات پینینگ معمولی استفاده شده است چرا که این روش یک روش کاربردی در ساخت قطعات توربینی است.

یکی از راه‌های مناسب برای اندازه‌گیری تنش پسماند به صورت غیر مخرب استفاده از تفرق پرتو ایکس است[22]، از آنجا که پره‌ها عموما از قیمت بالایی برخوردار هستند؛ به نظر می‌رسد توسعه این روش برای کاهش هزینه در صنعت توربین راهگشا باشد. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر تنش‌پسماند ایجاد شده حین پاشش ذره بر مقاومت به سایش است. هدف این تحقیق یافتن شرایط مناسب برای پاشش به جهت رسیدن به بیشترین مقاومت در برابر سایش یا فرسایش است. توربین گازی IGT25 تولید داخل توربین SGT600 ساخت زیمنس است که طرح ارتقاء یافته آن با نام IGT25+ شناخته می‌شود، تحقیق روی اجزاء این طرح ملی در حال ارتقاء از اهمیت بسزایی در جهت بومی سازی این صنعت بالادستی برخوردار است.

۲- روش تحقیق

برای این تحقیق از قطعاتی به ابعاد ۲×۴×۵ سانتیمتر از جنس آلیاژ فولادی 1.4923 که ترکیب شیمیایی آن بر حسب درصد وزنی در جدول ۱ آمده است، استفاده شد. این ترکیب شیمیایی به وسیله آزمایش اسپکترومتری نشری نوری بر اساس استاندارد ASTM E1086 با دستگاه Oxford (WAS) بدست آمد. برای این بررسی، در ابتدا قطعات تا مش ۱۰۰۰ برای زدودن کثیفی سطح، سمباده‌زنی شدند. این فولاد تحت عنوان فولاد کرومیومی مقاوم به حرارت برای ساخت قطعات توربینی، بویلرها، نیروگاه‌ها یا به طور کلی قطعات داغ تا دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد کاربرد دارد. استحکام تسلیم این فولاد ۶۰۰ MPa و استحکام نهایی آن نیز در محدوده ۹۵۰ MPa – ۸۰۰ قرار دارد.

سطح نمونه ها بوسیله دستگاهی که توسط کمپرسور فشار هوا ساچمه‌ها را به سمت سطح قطعه پرتاب می کرد، تحت عملیات ساچمه کوبی قرار گرفت. برای اجرای ساچمه کوبی از ساچمه‌های کروی از جنس فولاد آلیاژی و با قطر ۰/۲ الی ۰/۷ میلیمتر استفاده گردید. سختی این ساچمه‌ها بطور متوسط بین رنج ۵۰ تا ۵۵ راکول C بود. جهت انجام پاشش مناسب ساچمه ها به سطح نمونه، زاویه نازل با قطعه کار ۴۵ درجه و فاصله قطعه کار تا نازل ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. نمونه ها به مدت ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه در دستگاه ساچمه کوبی قرار داده شدند. نمونه ها بر اساس زمان ساچمه کوبی در جدول ۲ نام گذاری شدند. از آنجا که در صنعت عموما پیکره بندی دستگاه‌ها به نحوی است که فاصله و زاویه پاشش ثابت است، بنابراین در این تحقیق تنها زمان پاشش به عنوان متغیر در نظر گرفته شد.

به جهت برهم نخوردن حوزه‌های تنشی، نمونه‌ها با سرعت بسیار کم و تحت بارش آب به مدت ۲۰ دقیقه تحت پولیش کاری قرار گرفتند تا زبری‌های منجر به ایجاد خطا حذف گردد. برای بررسی تنش پسماند ایجاد شده ناشی از ساچمه کوبی، از دستگاه تفرق پرتو ایکس (XRD) با سرعت اسکن ۰/۰۵ درجه بر ثانیه و با طول موج اشعه ایکس ۱/۵۴۰۵۶ آنگستروم مس به وسیله دستگاه PHILIPS مدل PW1730 استفاده شد. رابطه اساسي در روش استاندارد پراش اشعه ایکس، قانون براگ است که در رابطه ۱ نشان داده شده است[23]:

$$n\lambda=2dkhlsin\theta \quad (۱)$$

که درآن n مرتبه انعکاس، λ [Ao] طول موج پرتو ایکس، d[Ao] فاصله بین صفحات کریستالي و θ زاویه انعکاس (زاویه براگ) مي‌باشد. کرنش، اختلاف فاصله بین صفحه اندازه‌گیری شده d و فاصله شبکه کرنش d_0 از طریق رابطه ۲ محاسبه می شود[23].

$$\varepsilon = \frac{d - d_o}{d_o} \quad (۲)$$

جدول ۱) ترکیب شیمیایی نمونه بر حسب درصد وزنی عناصر

عنصر	کربن	سیلیسیم	منگنز	گوگرد	فسفر
درصد وزنی	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۵۶	۰/۰۰۲	۰/۰۱۸
عنصر	کروم	مولیبدن	نیکل	آلومینیوم	آهن
درصد وزنی	۱۱/۲۳	۰/۹۰	۰/۴۲	۰/۲۲	بقیه

جدول ۲) نامگذاری نمونه ها بر اساس زمان ساچمه کوبی

کد نمونه	۱	۲	۳	۴	۵
زمان ساچمه کوبی (دقیقه)	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰

رابطه فوق از یافته‌های مربوط به مقادیر فاصله بین صفحه‌ای در ماده بدون تنش d_0 و در نمونه تحت بررسی d استفاده می‌کند. پرتو ایکس تابیده شده و منعکس شده به سطح نمونه، در جایي که داراي بیشترین شدت مي‌باشند، دریافت مي شود. يك پرتو اشعه ایکس تکفام که به وسیله آند فلزي تیوب‌هاي پرتو ایکس تولید مي‌شود، داراي طول موج مشخص بوده و هر تغییري در d، منجر به جابه‌جایي زاویه انعکاس مي‌شود. انتخاب يك قله منحني پراشي که براي تعیین تنش پسماند مناسب باشد تأثیر به سزایي بر دقت این روش دارد[23].

پراش هر نمونه در یک زاویه پراگ مشخص تشکیل می‌گردد. اگر در یک ماده تنش پسماند وجود داشته باشد، منحنی پراش به ازای چرخش نمونه در زوایای متفاوت ψ، در زاویه‌ای متفاوتی ایجاد می‌شود. اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس، محدود به سطح نمونه است. فرض می‌شود در سطح شرایط تنش صفحه‌ای برقرار باشد. در این شرایط تنش های عمود بر هم σ_1 و σ_2 در سطح نمونه وجود دارند و تنش σ_3 عمود بر این دو تنش صفر فرض می‌شود، اما مولفه کرنش عمود بر سطح نمونه ε_3، به علت ضریب پواسون و کرنش‌های ε_2 و ε_1 مخالف صفر است[24]. برای محاسبه تنش از معادلات ۳ و ٤ استفاده می‌شود[25].

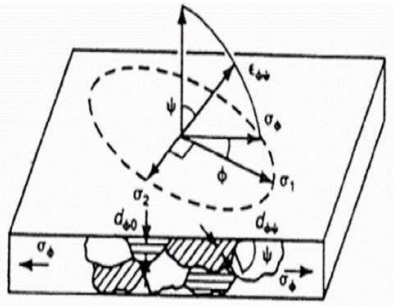
با توجه به وجود تنش‌های دو محوره ناشی از نیروی کششی، یک کرنش در امتداد محور X تولید می‌شود که یک اثر عرضی منطبق با قانون هوک است و رابطه مستقیمی با کرنش‌های طولی دارد و بوسیله آن می‌توان ضریب پواسون را طبق فرمول ۳ محاسبه کرد.

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = -V\varepsilon_z = \frac{-V\sigma_y}{E} \qquad (۳)$$

در نزدیکی سطح ماده، جایی که پرتو اشعه X اندازه گیری می‌شود، σz=0 است و کرنش مربوطه طبق معادله ٤ محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_z = -V(\varepsilon_x + \varepsilon_y) = \frac{-V}{E}(\sigma_x + \sigma_y) \qquad (۴)$$

که در آنها φ زاویه بین سطح نمونه و پرتو ورودی و ψ زاویه بین بردار عمود بر صفحه و نمیساز زاویه بین پرتوهای تابیده شده و منعکس شده از سطح نمونه است. در روابط E مدول الاستیک، V ضریب پواسون، σ تنش و ε کرنش است. در شکل ۱، اندرکنش پرتوها روی سطح نمونه نشان داده شده است.



شکل ۱) شرایط تنش صفحه ای و نمایش زوایای φ و ψ در روش پراش اشعه ایکس[24]

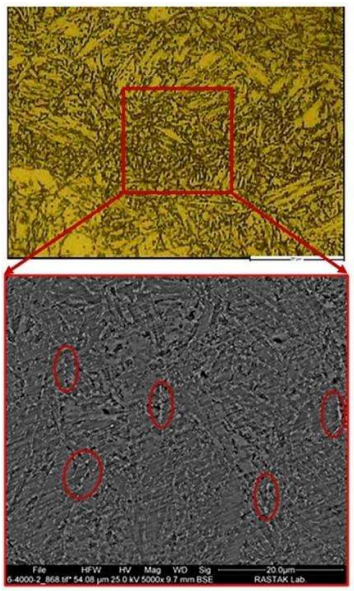
$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1+V}{E}(\sigma_1 cos^2\varphi + \sigma_2 sin^2\varphi)sin^2\psi - \frac{V}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \qquad (۵)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{(1+V)sin^2\psi}\left(\frac{d-d_o}{d_o}\right) \qquad (۶)$$

تئوری الاستیسیته برای جامد ایزوتروپیک نشان کرنش در امتداد زاویه φ را می‌توان از معادله ۵ و تنش را از معادله ٦ محاسبه کرد. ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری (OM) ساخت شرکت المپیوس و میکروسکوب الکترونی روبشی (SEM) ساخت شرکت PHILIPS مدل XL30 مجهز به شناساگر تفرق انرژی پرتو ایکس (EDS) بررسی شد. سپس میله‌های فلزی با طول ۲۰ میلیمتر و قطر ۵ میلیمتر و انتهایی به شکل نیم کره به قطر ۲۰ میلیمتر برای انجام تست سایش پین روی دیسک، به عنوان پین تحت سایش با دیسک آلومینایی آماده سازی شدند. آزمایش سایش طبق استاندارد ASTM G99 با نیروی اعمالی ۲۰ نیوتن در مسافت ۱۰۰۰ متر با سرعت معادل ۰/۲ متر بر ثانیه در دمای محیط انجام شد. سطح فرسوده نمونه‌ها با استفاده از SEM و EDS بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۲، تصویر OM ریزساختار فولاد مارتنزیتی 1.4923 نشان داده شده است. طبق جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد 1.4923 دارای کربن و کروم نسبتا بالایی است و ریزساختار زمینه شامل مارتنزیت حاوی تیغه‌های ریز کاربید کرم می‌باشد[26]. کاربیدهای تثبیت شده کروم در تصویر SEM شکل ۱ با بیضی قرمز نشان داده شده است. همانطور که در این تصویر مشخص است، کاربیدهای کروی ریز نیز در ساختار نمونه حضور دارند، این نوع از کاربید توانایی مقابله با مکانیزم دور زدن نابجایی‌ها را داشته و استحکام و سختی قطعه را افزایش می‌دهد.



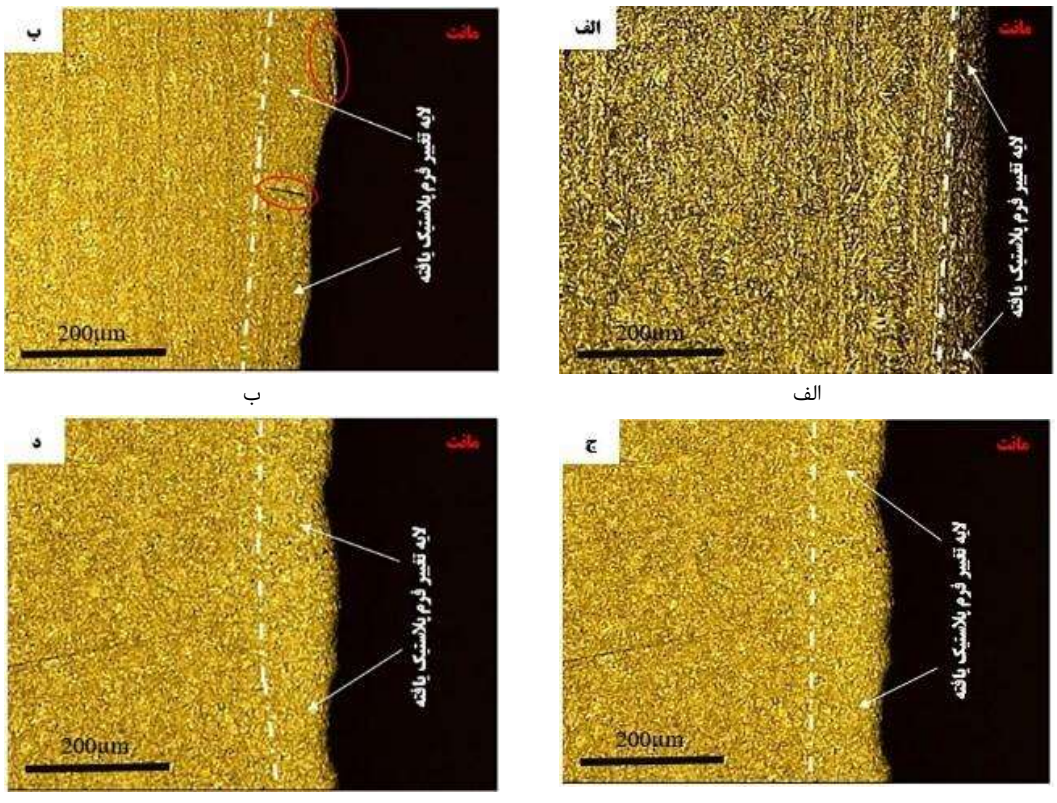
شکل ۲) تصویر OM و SEM ریزساختار فولاد 1.4923 قبل از عملیات ساچمه کوبی

شکل ۳ ریز ساختار سطح مقطع نمونه‌ها پس از ساچمه پاشی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود عملیات ساچمه کوبی باعث خردایش دانه‌های سطحی به علت تغییر شکل پلاستیک شدید در سطح شده است. بارش شدید و یکپارچه ساچمه‌ها سبب فشرده سازی سطح و در پی آن نزدیک شدن مرزهای دانه به یکدیگر می‌شود. افزایش دمای موضعی در پی برخورد و اصطکاک ذرات با سطح قطعه، سبب به وجود آمدن تبلور مجدد دینامیکی می‌شود. مکانیزم ذکر شده به همراه نزدیک شدن دانه‌ها در اثر اعمال فشار موضعی باعث کاهش اندازه دانه‌ها می‌شود که این عمل بر اساس تئوری هال-پچ باعث افزایش استحکام و سختی در سطح می‌گردد[26,27]. در اثر ساچمه‌کوبی معمولا مقداری تنش‌پسماند در نمونه باقی می‌ماند که به عنوان عامل خارجی و کمک کننده در مکانیزم‌های مبتنی بر نفوذ نقش تسریع کننده را ایفا می‌کند، لذا تبلور مجدد در دماهای پایین‌تری رخ می‌دهد[28]. از طرف دیگر، تغییر شکل پلاستیک شدیدی که رخ داده است، سبب افزایش دانسیته نابجایی‌ها در سطح و کاهش فاصله آنها با یکدیگر شده است که از طریق ایجاد جنگل نابجایی و قفل آنها، افزایش سختی لایه‌های سطحی را به دنبال دارد. این اتفاق در نهایت، مقاومت در برابر خستگی و در برخی موارد خوردگی به ویژه خوردگی تنشی را در پی دارد[29,30].

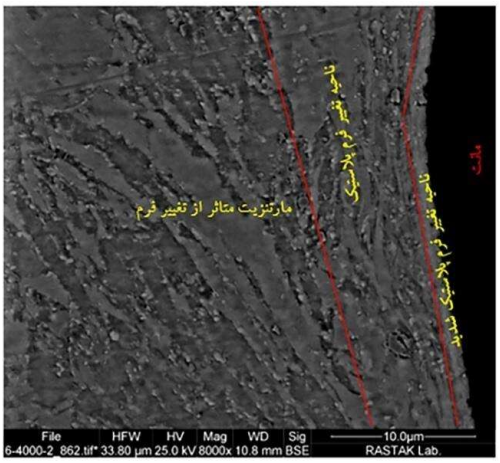
همانطور که مشخص است با افزایش زمان ساچمه کوبی، ضخامت لایه تغییر فرم پلاستیک یافته افزایش می‌یابد. در نمونه ۳، ترک‌های سطحی با بیضی‌های قرمز رنگ مشخص شده‌اند. تشکیل این ترک‌ها به واسطه کار شدید مکانیکی روی سطح از عیوب رایج ذره پاشی و ساچمه‌کوبی قطعات صنعتی است که می‌بایست کنترل گردد. ضخامت لایه تغییر فرم یافته در میزان تنش‌پسماند ایجاد شده موثر خواهد بود. در شکل ٤، تصویر SEM سطح مقطع نمونه ۳ نشان داده شده است. در تصویر SEM با افزایش دقت در بررسی سطح تغییر فرم یافته می‌توان این ناحیه را مطابق زیر تقسیم بندی نمود:

الف) ناحیه تغییر فرم پلاستیک با رژیم شدید، ب) ناحیه تغییر فرم پلاستیک با رژیم ملایم؛ و ج) ناحیه متاثر از تغییر فرم پلاستیک.

از تصویر SEM نشان داده شده در شکل ٤ می‌توان دریافت که سطح در تماس با ساچمه‌ها به صورت شدیدی تحت تغییر فرم پلاستیک قرار گرفته است، به نحوی که یک فرورفتگی در اثر تصادف گوی یا همان ساچمه با سطح در تصویر مشاهده می‌شود. در ادامه یک ناحیه تغییر فرم پلاستیک یافته مشاهده می‌شود که در آن منطقه مارتنزیت‌های تمپر شده در اثر کار سرد خرد شده و اندازه دانه‌ها تحت تغییر فرم پلاستیک و تبلور مجدد کاهش یافته است. در



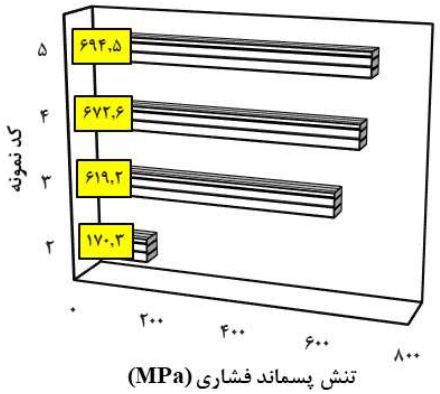
شکل ۳) سطح مقطع نمونه‌ها پس از ساچمه کوبی. الف) نمونه ۲، ب) نمونه ۳، ج) نمونه ۴؛ و د) نمونه ۵



شکل ۴) تصویر SEM از سطح مقطع نمونه ۳ پس از ساچمه کوبی

ناحیه متاثر از تغییر فرم یک کشیدگی جزئی روی ساختار پدیدار می‌گردد که جزء ماهیت فرآیندهای مکانیکی به حساب می‌آید، این ساختار ایجاد شده در عمل با ایجاد یک ساختار تدریجی به عنوان یک واسط عمل کرده و رفته رفته ساختار تغییر فرم پلاستیک شدید یافته را به ساختار عادی نزدیک می‌کند[31].

در شکل ۵، نمودار میله‌ای تغییرات تنش پسماند فشاری با تغییر در زمان ساچمه کوبی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است با افزایش زمان ساچمه‌کوبی میزان تنش پسماند سطحی افزایش یافته است. نمودار نشان دهنده آن است که بعد از ۱۰ دقیقه پاشش ساچمه، نرخ افزایش تنش پسماند کاهش یافته است. با برخورد ساچمه‌های فولادی در سطح نمونه، تغییر شکل پلاستیک اتفاق می افتد که این تغییر شکل همراه با گرما است، تغییر فرم پلاستیک موضعی در ساختار شبکه مکعبی مانند BCC با تجمع نابجایی‌ها سبب افزایش تنش پسماند فشاری می‌گردد[32,33]. بر اساس نظر ولفارت دو فرآیندی که در ایجاد تنش پسماند در عملیات ساچمه کوبی تاثیر دارند عبارتند از: کشش درون ساختاری ناشی از تغییر فرم پلاستیک مستقیم شدید در سطح فوقانی و تغییر شکل پلاستیک لایه پایینی که حداکثر تنش



شکل ۵) تغییرات میزان تنش پسماند با زمان ساچمه کوبی

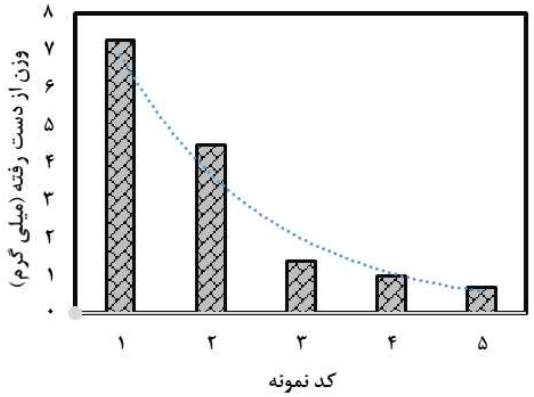
برشی را خواهد داشت[34]. این دو منطقه در شکل ٤ به خوبی نشان داده شده‌اند. برای فازهای سخت مانند مارتنزیت، تنش پسماند ناشی از کشش پلاستیک درون ساختاری و ظاهری است که با افزایش زمان ساچمه کوبی تنش فشاری ناشی از آن به جهت افزایش عمق ناحیه پلاستیک افزایش می‌یابد.

نصف عرض مرتفع‌ترین پیک در XRD متاثر از اندازه دانه، تغییر شکل کریستال‌ها (کرنش شبکه‌ای) و نقص شبکه است. تغییر شکل پلاستیک همراه با نقص شبکه و ایجاد کرنش در شبکه است که منجر به افزایش نصف ارتفاع پیک می شود[35,36]. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زمان ساچمه کوبی به دلیل تغییر شکل پلاستیک و افزایش نقص شبکه، عرض پیک افزایش می‌یابد[37].

تنش پسماند، یک ناحیه تنشی است که در صورت عدم اعمال بار خارجی بر روی سیستم، در داخل قطعه وجود دارد. کرنش‌های الاستیک قبل از تغییر فرم پلاستیک یا در مناطق متاثر از آن، منابع تنش‌های پسماند در قطعه هستند، تغییر فرم الاستیک در شبکه، اعوجاج میکروسکوپی در ساختار را در پی دارد که سبب تنش پسماند می‌شود. بنابراین منشا اصلی تنش‌های پسماند در طی اصلاح مکانیکی سطح مانند ساچمه کوبی، کرنش پلاستیکی است[38].

در اثر ساچمه‌کوبی تنش بحرانی مورد نیاز برای حرکت نابجایی‌ها محیا گشته و سبب حرکت آنها می‌شود. در همان صفحه لغزش که نابجایی شروع به حرکت می‌کند، هنگامی که افزایش مقدار نابجایی مانع از افزایش کسر حجمی مرزدانه‌ها شود، نابجایی‌های جدیدی شکل می گیرد[39]. در نتیجه تنش به راحتی در مجاورت دانه‌ها به دلیل تجمع نابجایی‌ها در مرزدانه ایجاد می‌شود. هنگامی که تنش به مقدار بحرانی می‌رسد، مرز دانه از بین رفته و یک دوقلویی در مقیاس کوچک با چگالی بالا تشکیل می‌شود. فعل و انفعالات بین مرزهای دوقلویی و نابجایی می‌تواند منجر به تبدیل به ساختارهای دو قلویی لایه ای دوبعدی به سه بعدی شود. از سوی دیگر به جهت افزایش دمای ناشی از برخورد ساچه به سطح نمونه و وجود انرژی تغییر فرم پلاستیک، دانه‌هایی با زاویه بسیار کم مرز دانه متبلور شده و رشد می‌کنند. این کاهش اندازه دانه‌ها یا تشکیل دانه‌ها با زاویای پایین و بالا رفتن چگالی نابجایی‌ها در مرزدانه سبب افزایش سختی و تنش پسماند فشاری می‌گردد[40]. در واقع تشکیل دانه‌های جدید و تقابل نابجایی‌ها با یکدیگر و با مرزهای اصلی غنی از نابجایی و مرزهای فرعی کم زاویه ایجاد شده باعث به وجود آمدن تنش‌پسماند در قطعه می‌گردد. به وجود آمدن کشش ناشی از سیلان ماده فوقانی به جهت تغییر فرم پلاستیک باعث تحت فشار قرار گرفتن سطح از جانب زیرلایه می‌گردد، بنابراین با افزایش زمان تغییر فرم مقدار آن افزایش یافته و در نتیجه تنش‌پسماند نیز افزایش می‌یابد.

در شکل ٦، تغییرات وزن از دست رفته هر نمونه در طول آزمون سایش نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود با



شکل ۶) تغییرات وزن از دست رفته هر نمونه در طول آزمون سایش

اعمال عملیات ساچمه کوبی روی نمونه‌ها، مقاومت به سایش نمونه‌ها حداقل به میزان ۳۹ درصد افزایش می‌یابد. این در حالیست که با افزایش تنش پسماند ناشی از افزایش زمان ساچمه‌کوبی، مقاومت به سایش تا حدود ۹۰ درصد افزایش می‌یابد. این یعنی می‌توان با مدیریت در میزان تغییر فرم پلاستیک ناشی از ساچمه کوبی، مقاومت در برابر سایش را تا حدود ۹۰ درصد افزایش داد.

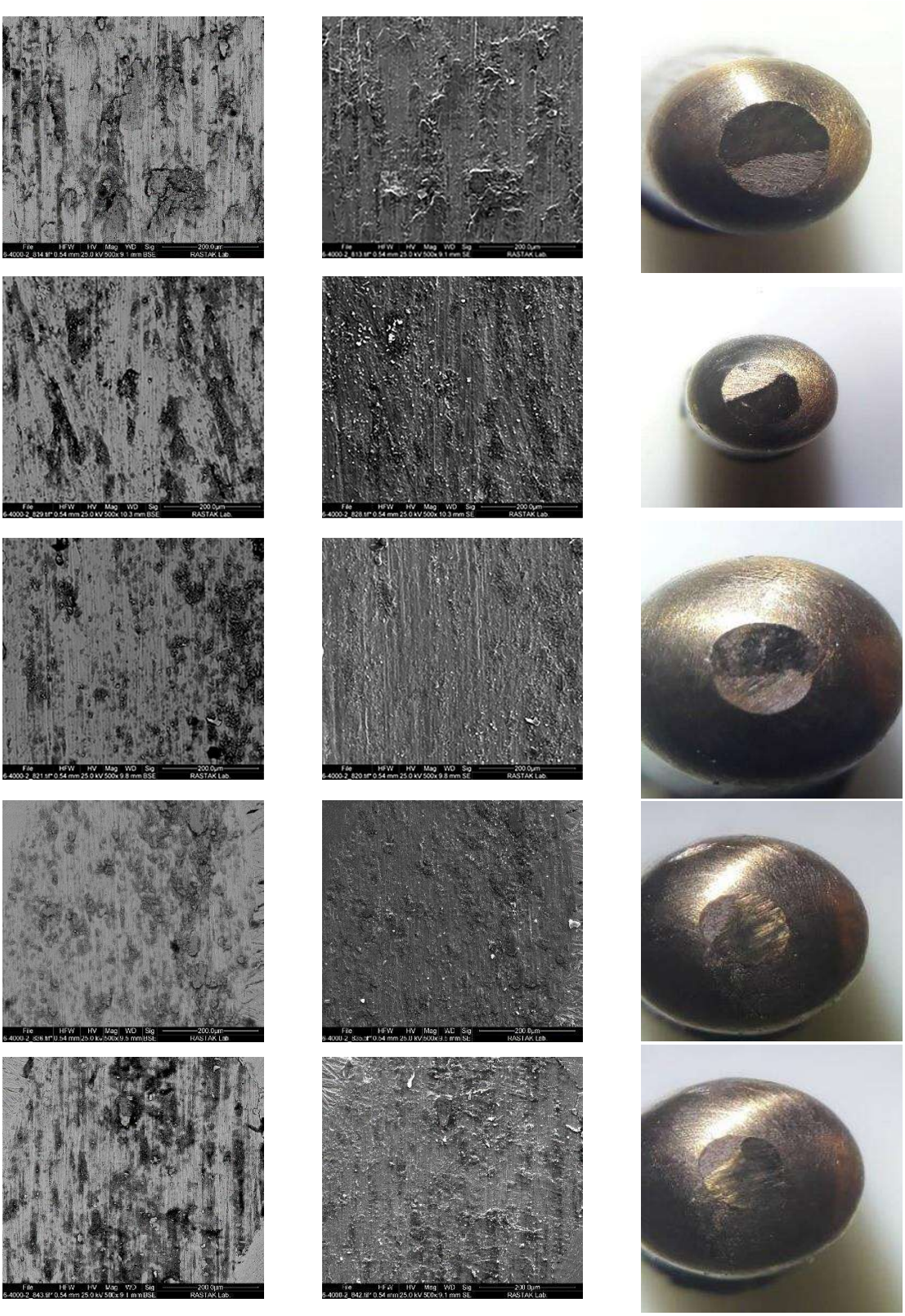
همانطور که در شکل ٦ مشاهده می شود با افزایش زمان ساچمه کوبی، رفته رفته روند افزایش مقاومت در برابر سایش در حال کاهش است. بدیهی است که با اعمال ساچمه‌کوبی، سختی سطح افزایش می‌یابد. از آنجا بر اساس تئوری‌های ذکر شده، سختی با مقاومت در برابر سایش رابطه مستقیم دارد، مقاومت در برابر سایش در اثر ساچمه‌کوبی افزایش می‌یابد. همانگونه که پیشتر نیز بیان شد با افزایش زمان ساچمه‌کوبی، دانه‌های کوچک با مرزهای زاویه کم و همینطور جنگل نابجایی در مجاورت مرزهای اصلی افزایش می‌یابند، در اثر بارگذاری سایشی این عوامل نقش ممانعت کننده را در برابر سیلان ماده عمل کرده و مقاومت ماده را در برابر سایش چسبان افزایش می‌دهند. از طرف دیگر افزایش سختی رخ داده در سطح نمونه، سبب افزایش مقاومت در برابر خراش شده و شخم زده شدن را به تعویق می‌اندازد. معمولا در اثر سایش، مقداری تغییر فرم پلاستیک زیر لایه تریبولوژیکی رخ می‌دهد[41]. در این مورد، با وجود لایه تغییر فرم یافته عملا زمان آسیب‌های سایشی به تاخیر می‌افتد. در شکل ۷، تصاویر SEM سطوح فرسوده نمونه‌های سایشی در دو مود الکترون برگشتی و الکترون ثانویه به همراه تصاویر استریوگرافی نشان داده شده است.

همانطور که در تصاویر مربوط به نمونه ۱ در شکل ۷ نشان داده شده است، تغییر فرم پلاستیک بسیار شدیدی در نمونه‌ها مشاهده می‌شود. تا جایی که قسمتی از نمونه به صورت ماکروسکوپی دچار شکست و کندگی شده است. تصاویر SEM این نمونه به خوبی خطوط ناشی از تغییر فرم پلاستیک به همراه مناطق اکسیدی و کنده شده را نشان می‌هد. بیشترین سطح آسیب در بین نمونه‌ها در این نمونه مشاهده می‌شود. در این تصاویر ترک‌های در حال رشدی مشاهده می‌شود که در صورت بهم پیوستن، مناطق کندگی بزرگی را مانند آنچه در تصویر استریوگراف این نمونه نشان داده شده است، پدید می‌آورند.

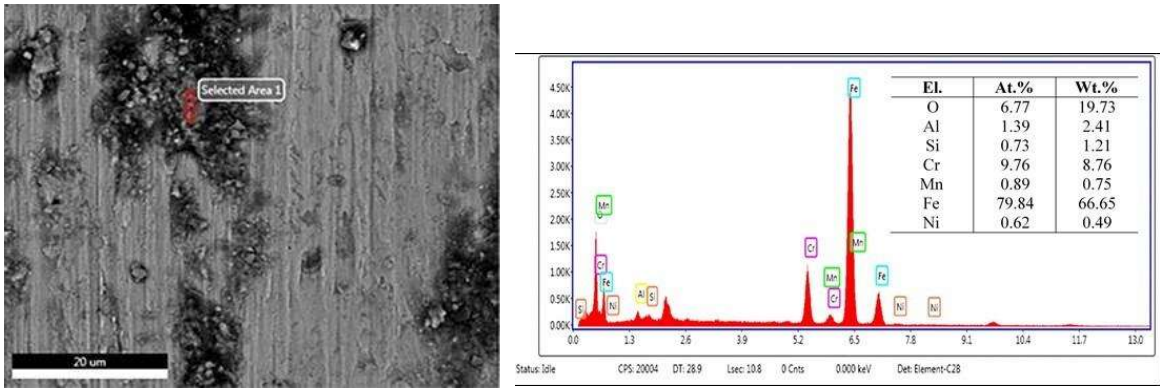
در تصاویر مربوط به نمونه ۲، مشخص است که میزان تغییر فرم پلاستیک افزایش داشته اما میزان حجم کندگی‌های ناشی از سایش کاهش یافته است. به جهت افزایش استحکام سطحی و چقرمه‌تر شدن، سطح نمونه دچار تغییر فرم شده و از میزان کندگی‌ها کاسته شده است، این درحالیست که عمق کندگی‌ها بیشتر شده است. افزایش استحکام سطحی سبب تغییر فرم پلاستیک بیشتر و جلوگیری از خراش و کندگی می‌شود[42]. در این نمونه نیز آثار سایش اکسیدی مشاهده می‌گردد. در شکل ۸، تصویر طیف EDS از منطقه اکسید شده نمونه ۳ مشاهده می‌شود. وجود آلومینیم در نتایج EDS به دلیل کنده شدن ذرات از سطح دیسک آلومینایی و چسبیدن آن به پین است. همانطور که از تصاویر SEM مربوط به نمونه ۳ در شکل ۷ و SEM شکل ۸ پیداست، پیرامون مناطق اکسیدی، کندگی دیده می‌شود. ذرات سایشی ایجاد شده در طول سایش، به همراه ذرات اکسیدی تشکیل شده روی سطح بر اثر اعمال فشار حین سایش، فشرده شده و تشکیل لایه اختلاط مکانیکی یا لایه تریبولیژیکی می‌دهند. این لایه‌های سخت با اعمال تنش ناشی از سایش کارسخت شده و پس از مدتی تحت مکانیزم تورق و یا کندگی یکپارچه از سطح جدا می‌شوند[43].

در نمونه ۳، به وضوح از تصاویر استریوگرافی می‌توان دریافت که مساحت سطح کنده شده در مقایسه با دو نمونه دیگر در حال کاهش است، این کاهش تاجایی ادامه دارد که در دو نمونه ٤ و ٥ به ترتیب به کمترین مقدار خود می‌رسد. در نمونه ۳، سطح به طور غیر یکنواخت پر از ذرات اکسیدی شده و عمق خراش‌های به وجود آمده بسیار کم است. در حالی که در دو نمونه ٤ و ٥ تعداد و عمق این خراش‌ها در حال افزایش است. تا جایی که در نمونه ٥، وجود خراش‌ها به حداکثر مقدار رسیده است. اما در نمونه ۳، آثار سایش خراشان در حال کاهش و در گوشه سمت چپ پایین در حال حذف است. کندگی‌ها و تورق‌های سطحی و کم در نمونه ٥ مشاهده می‌شود. همانطور که از تصاویر SEM مشخص است با افزایش زمان ساچمه‌کوبی، عمق خراش‌ها در حال کاهش اما تعداد آنها در حال افزایش است. به نظر می‌رسد این پدیده ناشی از افزایش عمق سختی باشد. در ساچمه کوبی، افزایش نرخ تغییر فرم پلاستیک ناشی از افزایش فشار پاشش یا زمان پاشش، می‌تواند باعث افزایش عمق سختی شود[44]. این عمل تعداد خراش‌ها را به جهت کار سخت شدن در مسافت‌های بالا زیاد کرده اما مانع رشد ترک و عمیق شدن خراش‌ها می‌شود.

با افزایش تنش پسماند در سطح نمونه، اندازه دانه‌ها و میزان چگالی مرزهای دانه به صورت تدریجی و تابع گونه به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد[45]. این درحالی است که به سمت مرکز



شکل ۷) تصاویر SEM و استریوگرافی پین‌های تحت سایش



شکل ۸) آنالیز EDS از مناطق اکسیدی نمونه ۳

این خواص رفته رفته تغییر می‌کنند و سختی به تدریج کاهش می‌یابد. این زیرلایه یا بستر نرم مانع از گسترش ترک‌های عمودی یا خراش می‌گردد. وجود تنش پسماند فشاری در سطح خود نیز مانع از جوانه‌زنی و رشد ترک از سطح به سمت مرکز قطعه می‌شود، تاجایی که در برابر بارگذاری‌های دینامیکی مانند خستگی، قطعه را بسیار مستحکم می‌کند[46]. از آنجا که بارگذاری سایشی نیز نوعی بارگذاری دینامیک است این رابطه را برای مکانیزم سایش نیز می‌توان تعمیم داد که نتایج بدست آمده دراین تحقیق نیز این موضوع را اثبات می‌کنند. وجود تنش‌های پسماند و تقابل آنها با موانعی مانند مرزهای جدید به وجود آمده در طول ساچمه‌کوبی مانع از رسیدن کران بالای تنش نرمال و برشی در اتمسفر سایش به قطعه می‌شود[47]. نتایج ارائه شده در این تحقیق می‌تواند زمینه ساز افزایش مقاومت پره‌های کپرسور در برابر فرسایش، سایش و خستگی در حین پروسه تولید و مدیریت زمان یکی از عملیات‌های تکمیلی باشد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- افزایش زمان ساچمه‌کوبی ضخامت لایه تغییر فرم پلاستیک یافته را افزایش می‌دهد. ناحیه تغییر فرم پلاستیک یافته را به صورت میکروسکوپی می‌توان به سه ناحیه تغییر فرم شدید پلاستیک، تغییر فرم پلاستیک معمولی؛ و متاثر از تغییر فرم پلاستیک تقسیم بندی نمود.

۲- افزایش زمان ساچمه‌کوبی منجر به افزایش چگالی مرزهای کم زاویه و نابجایی‌ها پیرامون مرزهای اصلی می‌شود که این موضوع میزان تنش‌پسماند فشاری را در سطح افزایش می‌دهد.

۳- ساختار فولاد 1.4923 با افزایش زمان ساچمه کوبی به سمت خرد شدن مارتنزیت‌ها، ممانعت در برابر حرکت نابجایی‌ها و افزایش کرنش شبکه به جهت خردایش مارتنزیت زمینه متمایل می‌گردد.

٤- با افزایش زمان ساچمه کوبی تا ۱۰ دقیقه، تنش پسماند تا بیش از ٦۰۰ MPa به طور چشم‌گیری افزایش یافت. میزان افزایش تنش پسماند نیز از زمان پاشش ساچمه ۱۰ دقیقه به بعد به دلیل کاهش میزان تغییر فرم پلاستیک، کمتر شد.

۵- مقاومت به سایش فولاد مارتنزیتی 1.4923 بر اثر اعمال و افزایش زمان ساچمه کوبی افزایش می‌یابد. مکانیزم غالب برای این فولاد، چسبان اکسیدی است که با افزایش تنش پسماند، این مکانیزم به سمت خراشان اکسیدی با شواهد کندگی به جهت کارسختی بیش از حد لایه تریبولوژیکی پیشروی می‌کند.

٦- با افزایش تنش پسماند، مقاومت در برابر سایش نمونه ها افزایش یافت و این موضوع به دلیل ممانعت در برابر تغییر فرم پلاستیک ناشی از تجمع نابجایی‌ها و ریزدانگی بود.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مرکز تحقیقات استحکام و عمر مواد پوشش انستیتو توربین گاز برای در اختیار گذاشتن تجهیزات ابراز می‌دارند.

تاییدیه اخلاقی: نتایج علمی بیان شده فعالیت‌های پژوهشگران مقاله بوده و تا کنون در مجله دیگری چاپ نگردیده است؛ همچنین صحت نتایج بر عهده نویسندگان مقاله می‌باشد.

تعارض منافع: نویسندگان مقاله اعلام می‌دارند که مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافعی با اشخاص و سازمان‌ها ندارند.

سهم نویسندگان: آرش خیابانی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/ نگارنده مقاله و روش شناس (۳۰٪)، مهدی نصری (نویسنده دوم)، پژوهشگر فرعی/ اجراء (۲۰٪)، یزدان شجری (نویسنده سوم) پژوهشگر اصلی/ تحلیل نتایج (۳۰%)، زهراسادات سیدرئوفی (نویسنده چهارم و نویسنده مسئول) پژوهشگر اصلی/ کمک در روند شناسی و تحلیل نتایج (۲۰%).

منابع مالی: تامین تمامی هزینه‌ها به صورت شخصی بوده است.

منابع

1- Nowell D, Duo P, Stewart IF. Prediction of fatigue performance in gas turbine blades after foreign object damage. International journal of fatigue. 2003;25(9-11):963-9.

2- Fard SB, Guagliano M. Effects of surfaces nanocrystallization induced by shot peening on

material properties: a Review. Frattura ed Integrità Strutturale: Annals. 2009;2010:3.
3- Ma X, Langelier B, Gault B, Subramanian S. Effect of Nb addition to Ti-bearing super martensitic stainless steel on control of austenite grain size and strengthening. Metallurgical and Materials Transactions A. 2017;48(5):2460-71.
4- Deng XT, Cheng M, Zhang SH, Song HW, Taha MA. Residual stresses and martensite transformation in AISI 304 austenitic stainless steel. Materials Research Express. 2018;6(1):016503.
5- Tlili S, Beliardouh NE, Ramoul CE. Thermal treatment effect on tribological and corrosion performances of 13Cr5Ni2Mo super-martensitic stainless steel. Tribology in Industry. 2018;40(3):433-9.
6- Tianjian W, Yubing P, Zhenhuan G, Hua F, Gongxian Y. Stress corrosion behavior of 12Cr martensite steel for steam turbine LP blade. InEnergy Materials 2014 Springer, Cham. 2014:327-332.
7- Baudrand D. ASM Metals Handbook, Surface Engineering, 1994.
8- Wu Q, Xie DJ, Jia ZM, Zhang HZ. Effect of shot peening on surface residual stress distribution of SiCp/2024Al. Composites Part B: Engineering. 2018;154:382-7.
9- Iadicola MA, Gnäupel-Herold TH. Effective X-ray elastic constant measurement for in situ stress measurement of biaxially strained AA5754-O. Materials Science and Engineering: A. 2012;545:168-75.
10- Lee S, Kim S, Hwang B, Lee BS, Lee CG. Effect of carbide distribution on the fracture toughness in the transition temperature region of an SA 508 steel. Acta materialia. 2002;50(19):4755-62.
11- Sun Y. Sliding wear behaviour of surface mechanical attrition treated AISI 304 stainless steel. Tribology International. 2013;57:67-75.
12- Liu YR, Ye D, Yong QL, Su J, Zhao KY, Jiang W. Effect of heat treatment on microstructure and property of Cr13 super martensitic stainless steel. Journal of iron and steel research international. 2011;18(11):60-6.
13- Pfennig A, Kranzmann A. Potential of martensitic stainless steel X5CrNiCuNb 16-4 as pipe steel in corrosive CCS environment. International Journal of Environmental Science and Development. 2017;8(7):466-73.
14- Ma X, Langelier B, Gault B, Subramanian S. Effect of Nb addition to Ti-bearing super martensitic stainless steel on control of austenite grain size and strengthening. Metallurgical and Materials Transactions A. 2017;48(5):2460-71.
15- Zhao PJ, Chen ZH, Dong CF. Failure analysis of warm stamping of magnesium alloy sheet based on an anisotropic damage model. Journal of materials engineering and performance. 2014;23(11):4032-41.
16- Singh V, Marya M. Surface modification of oilfield alloys by ultrasonic impact peening: UNS N07718, N07716, G41400, and S17400. Journal of Materials Engineering and Performance. 2016;25(1):338-47.
17- Kim SJ, Hyun KY, Jang SK. Effects of water cavitation peening on electrochemical characteristic by using micro-droplet cell of Al–Mg alloy. Current Applied Physics. 2012;12:S24-30.
18- Trško L, Guagliano M, Bokůvka O, Nový F, Jambor M, Florková Z. Influence of severe shot peening on the surface state and ultra-high-cycle fatigue behavior of an AW 7075 aluminum alloy. Journal of Materials Engineering and Performance. 2017;26(6):2784-97.
19- Zabeen S, Preuss M, Withers PJ. Evolution of a laser shock peened residual stress field locally with foreign object damage and subsequent fatigue crack growth. Acta materialia. 2015;83:216-26.
20- Pretorius JG, Desai DA, Snedden GC. Effect of laser shock peening on fatigue life at stress raiser regions of a high-speed micro gas turbine shaft: A simulation based study. InInternational Journal of Engineering Research in Africa, Trans Tech Publications Ltd. 2019:45:15-27.
21- Vaxevanidis NM, Manolakos DE, Koutsomichalis A, Petropoulos G, Panagotas A, Sideris I, Mourlas A, Antoniou SS. The effect of shot peening on surface integrity and tribological behaviour of tool steels. AITC-AIT; Parma, Italy. 2006.
22- Xuesong F, Niu Z, Deng Y, Zhang J, Liu C, Chen G, Li Z, Zhou W. Accuracy of X-ray diffraction measurement of residual stresses in shot peened titanium alloy samples. Nondestructive Testing and Evaluation. 2019:34:164-177.
23- Prevey PS. X-ray diffraction residual stress techniques. ASM International, ASM Handbook. 1986;10:380-92.
24- Ahmed II, Adebisi JA, Abdulkareem S, Sherry AH. Investigation of surface residual stress profile on martensitic stainless steel weldment with X-ray diffraction. Journal of King Saud University-Engineering Sciences. 2018;30(2):183-7.
25- Gadalińska E, Malicki M. X-ray stress measurements in the institute of aviation possibilities and examples. Journal of KONES. 2018;25.
26- Yang R, Zhang X, Mallipeddi D, Angelou N, Toftegaard HL, Li Y, Ahlström J, Lorentzen L, Wu G, Huang X. Effect of shot peening on the residual stress and mechanical behaviour of low-temperature and high-temperature annealed martensitic gear steel 18CrNiMo7-6. InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing. 2017:219:012046.
27- Segurado E, Belzunce FJ, Pariente IF. Effects of low intensity shot peening treatments applied with different types of shots on the fatigue performance of a high-strength steel. Surface and Coatings Technology. 2018;340:25-35.
28- Hirsch TK, Rocha AD, Ramos FD, Strohaecker TR. Residual stress-affected diffusion during plasma nitriding of tool steels. Metallurgical and Materials Transactions A. 2004;35(11):3523-30.
29- Wang C, Lai Y, Wang L, Wang C. Dislocation-based study on the influences of shot peening on fatigue resistance. Surface and Coatings Technology. 2020;383:125247.
30- Al-Obaid YF. The effect of shot peening on stress corrosion cracking behaviour of 2205-duplex stainless

steel. Engineering Fracture Mechanics. 1995;51(1):19-25.
31- Dadfarnia M, Schembri PE, Sofronis P, Foulk JW, Nibur KA, Balch DK. On modeling hydrogen-induced crack propagation under sustained load. JOM. 2014;66(8):1390-8.
32- Luo KY, Yao HX, Dai FZ, Lu JZ. Surface textural features and its formation process of AISI 304 stainless steel subjected to massive LSP impacts. Optics and Lasers in Engineering. 2014;55:136-42.
33- Stovall M, Smith SA, Langholz BM, Boice Jr JD, Shore RE, Andersson M, Buchholz TA, Capanu M, Bernstein L, Lynch CF, Malone KE. Dose to the contralateral breast from radiotherapy and risk of second primary breast cancer in the WECARE study. International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics. 2008;72(4):1021-30.
34- Lin Q, Liu H, Zhu C, Chen D, Zhou S. Effects of different shot peening parameters on residual stress, surface roughness and cell size. Surface and Coatings Technology. 2020;398:126054.
35- Cullity BD. Elements of X-ray Diffraction. Addison-Wesley Publishing; 1956.
36- Ungar TJ. Microstructural parameters from X-ray diffraction peak broadening. Scripta Materialia. 2004;51(8):777-81.
37- Wang T, Yu J, Dong B. Surface nanocrystallization induced by shot peening and its effect on corrosion resistance of 1Cr18Ni9Ti stainless steel. Surface and Coatings Technology. 2006;200(16-17):4777-81.
38- Kumar RK, SampathKumaran P, Seetharamu S, Kumar SA, Pramod T, Naveen GJ. Investigation of shot peening effect on titanium alloy affecting surface residual stress and roughness for aerospace applications. Procedia Structural Integrity. 2019;14:134-41.
39- Wang J, Salihi EC, Šiller L. Green reduction of graphene oxide using alanine. Materials Science and Engineering: C. 2017 Mar 1;72:1-6.
40- An XH, Lin QY, Wu SD, Zhang ZF. Improved fatigue strength of nanostructured Cu and Cu-Al alloys. Mater. Res. Lett. 2015;3:135-41.
41- Moshkovich A, Perfilyev V, Rapoport L. Effect of plastic deformation and damage development during friction of fcc metals in the conditions of boundary lubrication. Lubricants. 2019;7(5):45.
42- Marques IJ, Silva FJ, França TS, Sousa GG, Hermenegildo TF, Santos TF. Evaluation of Abrasive Wear in UNS S32101 and S32750 Duplex Stainless Steels Submitted to Friction Stir Processing. Materials Research. 2020;22.
43- Cai C, Song R, Liu S, Feng Y, Pei Z. Wear behavior and subsurface layer work hardening mechanism of Fe-24.1 Mn-1.21 C-0.48 Si steel. Procedia engineering. 2017;207:2251-6.
44- Maleki E, Unal O. Optimization of shot peening effective parameters on surface hardness improvement. Metals and Materials International. 2020:1-3.
45- Cipriani E, Nigro M, Fusco G, Colombaroni C. Effectiveness of link and path information on simultaneous adjustment of dynamic OD demand matrix. European Transport Research Review. 2014;6(2):139-48.
46- Coors T, Pape F, Poll G. Comparing the Influence of Residual Stresses in Bearing Fatigue Life at Line and Point Contact. Residual Stresses 2018: ECRS-10. 2018;6:215.
47- Tomaz ÍD, Martins MC, Costa HR, Bastos IN, Fonseca MC. Influence of residual stress on the sliding wear of AISI 4340 steel. Matéria (Rio de Janeiro). 2020;25.