



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی

مهندسی مواد، متالورژی و معدن
26 بهمن ماه 1401 - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



مطالعه خصوصیات تریبولوژیکی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی مورد استفاده در پره های توربین بخار شرکت کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان

محمدرضا توکلی شوشتری، استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی،
دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران¹، m_tavakoli@scu.ac.ir
سید محمد لاری بقال، استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه
شهید چمران اهواز، ایران¹
سید رضا علوی زارع، استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه
شهید چمران اهواز، ایران¹
ابراهیم موسوی پور، شرکت کشت و صنعت نیشکر حکیم فارابی، ایران²

چکیده

در صنایع نیروگاههای بخار بویژه در توربین های بخار شرکت های تولید نیشکر، فولادهای زنگ نزن
مارتنزیتی در اجزای مختلفی که همواره تحت شرایط سایش لغزشی و رفتگی هستند به کار رفته است.
پره LP توربین بخار، بدلیل کاهش فشاری که در اثر تقطیر بخار به وجود می آید به قطرات ریز آب
برخورد کرده و دچار پدیده سایش از نوع رفتگی می شود. در این تحقیق خصوصیات سایش لغزشی (Wear)
و رفتگی (Erosion) فولاد مارتنزیتی 420 مورد بررسی قرار گرفته است. برای خصوصیات سایشی
لغزشی از دستگاه Pin-On-Disk تحت شرایط خشک و در دمای اتاق استفاده شده است. برای این منظور
نمونه های سایشی تحت بار ثابت در سرعت های مختلف آزمایش شدند. همچنین برای مطالعه رفتار
رفتگی این فولاد، دستگاهی در آزمایشگاه طراحی شد و اثر زمان و زاویه رفتگی در 3 زاویه 30، 45 و
90 درجه در محیط آب صنعتی مورد استفاده در شرکت کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان و در
معرض برخورد ذرات ساینده سیلیس، مورد بررسی قرار گرفت و نرخ رفتگی محاسبه گردید. پس از
انجام آزمایش، در هر دو مورد سایش لغزشی و رفتگی مکانیزم های تخریب سطحی به وسیله عکس
های گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد شناسایی و تحلیل قرار گرفت.
واژه های کلیدی: فولاد زنگ نزن مارتنزیتی؛ سایش لغزشی؛ رفتگی؛ مکانیزم تخریب سطحی.

1-مقدمه

¹ گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
² شرکت کشت و صنعت نیشکر حکیم فارابی، خوزستان، ایران



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی

مهندسی مواد، متالورژی و معدن
26 بهمن ماه 1401 - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



فولاد زنگ نزن نوع 420 یکی از اعضا پرکربن خانواده فولادهای زنگ نزن ماتنریتی محسوب می شود که به دلیل مقاومت به خوردگی عالی و استحکام بالا در پره ها و قسمت های چرخان موتور دمنده های صنعتی، موتور هواپیما، پره های توربین، پمپ ها، شافت و ... کاربرد دارند [4-1]. اما به دلیل سختی نسبتاً کم و مقاومت به سایش ضعیف، پره های توربین بخار مخصوصاً تیغه های فشار کم (LP) در صنایع نیروگاهی مستعد به سایش رفتگی ناشی از قطرات آب³ هستند [5].

در سایش رفتگی، ذرات جامد معلق در سیال، به سطح جسم (نمونه) برخورد کرده و اثرات مختلفی در سطح ایجاد می کند. شدت تخریب سطح بستگی به عوامل مختلفی از جمله اندازه، شکل و ماهیت ذرات ساینده، زاویه، سرعت و مدت زمان برخورد دارد. عواملی همچون میزان تحلیل رفتن سطح، تغییرات مورفولوژی آن، تشکیل ترک، شیارهای ریز، تغییر شکل پلاستیکی و کندگی، به همراه نرخ سایش محاسبه شده، می تواند به شناسایی مکانیزم های غالب در هر دو مورد کمک کند [6]. پره های توربین های بخار، حین سرویس تحت نیروهای خمشی و گریز از مرکز بالایی قرار می گیرند. در مرحله آخر LP توربین، بدلیل کاهش فشاری که در اثر تقطیر بخار روی لوله های کندانسور به وجود می آید، پره ها، به قطرات ریز آب برخورد کرده و دچار پدیده سایش از نوع رفتگی می شوند که در نهایت می تواند منجر به شکست پره ها گردد مخصوصاً در نواحی که تحت سرعت بالایی در حدود (450-600) m/s قرار دارند [7]. اهمیت این مسئله، پرداختن به بحث سایش رفتگی را در صنایع نیروگاه های بخار موجب می شود [9-15].

از طرف دیگر، در صنایع نیروگاهی در یک واحد 300 مگاواتی حدود 5000 والو⁴ مورد استفاده قرار می گیرد که نزدیک به 2000 عدد در شرایط دما و فشار مشابه با شرایط کاری پره های LP توربین بخار کار می کنند و تحت سایش لغزشی با تخریب زیاد در بازه های زمانی کوتاه مواجه اند [10].

سایش لغزشی نتیجه ی تماس و حرکت نسبی بین دو جسم جامد است. تماس واقعی در ابتدا به چند ناحیه کوچک از جمله به ناهمواری های سطحی محدود شده ولی در ادامه در اثر ترکیب تنش و حرکت محدود، تماس نقاط بیشتر شده و ممکن است که پدیده هایی از قبیل تغییر شکل پلاستیکی، جدا شدن ذرات، بالا رفتن دما و ... نیز اتفاق افتد. شدت و ضعف تشکیل این ذرات و میزان آنها بستگی به عوامل مختلفی از جمله بار اعمالی، سرعت، مسافت طی شده، دما و دیگر متغیرهای آزمایش دارد. همچنین تحت شرایطی ممکن است که در اثر اصطکاک، دو سطح در تماس بهم چسبیده و سایش چسبان را بوجود آورند [6].

در این کار تحقیقی، رفتار سایشی و رفتگی این فولاد زنگ نزن استفاده شده در پره های توربین های بخار شرکت کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل ارائه شده است.

2- روش تحقیق

برای انجام آزمایشات از آلیاژ مورد استفاده در پره های LP توربین بخار از جنس فولاد زنگ نزن ماتنریتی 420 کوئنچ شده از دمای 1020 درجه سانتی گراد و تمپر شده در دمای 600 درجه سانتی گراد، استفاده شد. آنالیز ترکیب شیمیایی این آلیاژ بر حسب درصد وزنی به روش کوآتومتری، در جدول 1 آمده است. برای مشاهده میکروساختار آلیاژ، از محلول لچ ویلا⁵ استفاده شد و تصاویر بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) LEO 1455VP بدست آمد.

%V	%Cu	%Mo	%Ni	%Cr	%S	%P	%Mn	%Si	%C
2,0	3,0	8,0	1	5,11	025,0	03,0	1,0	6,0	15,0

³-Liquid droplet erosion(LDE)
⁴-Valve
⁵-Vilella



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی

مهندسی مواد، متالورژی و معدن
26 بهمن ماه 1401 - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



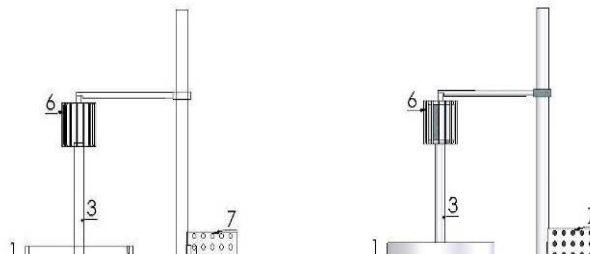
جدول 1. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی 420

1-2-آزمون ساییش لغزشی

جهت انجام تست های ساییش لغزشی از یک دستگاه آزمایشگاهی ساییش pin-on-disc مدل TRM250 ساخت شرکت المانی Wazau و مطابق با استاندارد [ASTM G99-95] 11 استفاده گردید. این دستگاه قابلیت ثبت اطلاعات حاصله از تست ساییش را توسط نرم افزار TriboV43L را دارا بوده و همچنین کنترل پارامترهای مختلف آزمایش از قبیل سرعت، بار اعمالی، دما، مسافت ساییش را برآحتی امکان پذیر می ساخت. تمامی تست های ساییش تحت شرایط خشک در دمای اتاق و تحت بار ثابت 45 نیوتن و تا مسافت 1000 متر، اما در دو سرعت لغزش مختلف 15/0 و 6/0 متر بر ثانیه انجام گرفت. نمونه های استوانه ای شکل ساییش، دارای ابعاد 6 میلیمتر قطر و 33 میلیمتر طول بوده و توسط ماشین کاری تهیه گردیدند. برای صفحه ساییش از یک دیسک فولادی عملیات حرارتی شده با سختی RC63-60 از جنس 52100E (6Cr100) استفاده گردید. قبل از هر آزمون، سطح تمام نمونه ها با کاغذ سمیاده مش 1200 ساییده شدند. این کار با بستن کاغذ سمیاده بر روی صفحه ساییشی و طی مسافت 100 متر صورت گرفت تا از تماس تمام سطح نمونه با صفحه فولادی اطمینان حاصل شود. ضریب اصطکاک و میزان ساییش (بصورت کاهش ارتفاع) در هر لحظه از آزمایش هم بصورت عددی و هم بصورت نمودار قابل نمایش و ثبت بود. آزمون ساییش برای هر نمونه 3 بار تکرار گردید و پس از آزمون، سطوح ساییش یافته و زبره های حاصل از ساییش مورد بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار گرفتند.

2-2-آزمون ساییش رفتگی

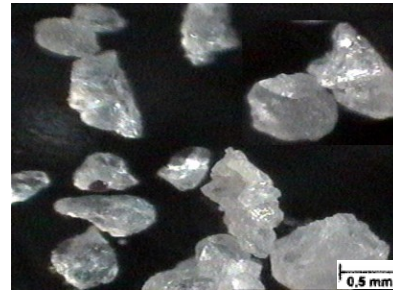
جهت انجام آزمون رفتگی، از یک دستگاه آزمایشگاهی طبق استاندارد [ASTM G73-98] 12 استفاده شد. نمای درون و برون و اجزای مختلف دستگاهی که جهت انجام این تست مورد استفاده قرار گرفت، در شکل 1 نشان داده شده است. جنس مخزن پلیمری و حجم آن 9000 میلی لیتر می باشد. شفت مورد استفاده از جنس فولاد ضد زنگ بوده و پروانه ای از جنس فایبرگلاس بوسیله یکی پیچ به آن متصل می شود. برای به حداقل رساندن لرزش و لنگ زدن شفت در حین دوران، یک بلبرینگ و یک کاسه نم در کف مخزن تعبیه شده و انتهای دیگر شفت به یک موتور عمودی با قدرت نسبتاً زیاد متصل می شود. نمونه ها بصورت کشویی در نمونه گیر قرار داده می شود. هر نمونه گیر دو نمونه رادر جای داده که این مکان ها برای زوایای برخورد 30، 45 و 90 درجه طراحی شده اند (شکل 2). این دو نمونه گیر در مقابل پروانه چرخان و در دو طرف مخزن قرار می گیرند. سیال آزمایش، آب صنعتی مورد استفاده در شرکت گشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان می باشد. همچنین از ذرات ماسه سیلیسی بعنوان عامل ایجاد رفتگی استفاده شد. به همین خاطر ماسه سیلیسی ابتدا شستشو داده شده و خشک گردید و با الک کردن، ذرات با اندازه معین معادل با عدد مش بین 30 تا 150 طبق استاندارد انگلستان، انتخاب و به میزان 30% حجمی، به سیال آزمایش، اضافه شد. تصویر گرفته شده از ذرات ماسه قبل از آزمایش در شکل 3 نشان داده شده است. نمونه های رفتگی با ابعاد 10 mm عرض، 12 mm طول و 1 mm ضخامت تهیه و سپس با پودر آلومینای 3/0 μm و 05/0 μm پولیش، شستشو و توزین شدند. بعد از آزمایش رفتگی نیز نمونه ها شستشو و با ترازوی دقیق الکترونی وزن شدند. تمامی نمونه های رفتگی، تحت شرایط سرعت چرخش ثابت پروانه 3 m/s، زوایای برخورد 30، 45 و 90 درجه قرار داده شده و مدت زمان چرخش در هر زاویه 5/7 و 30 ساعت انتخاب گردید. سپس کاهش وزن نمونه ها محاسبه و همانند آزمایش ساییش، سطوح ساییده شده مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت.





دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی

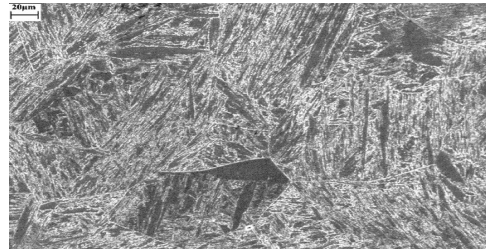
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
26 بهمن ماه 1401 - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



ریز ساختار
پرز شده که در حالت های استیست و بیست نسبی است

3-
در ش
است
اند به

سه قبل
رفتگی



3-1- سایش لغزشی

در این مطالعه، از معادله سایش ارچارد [13] یعنی کاهش حجم تجمعی (V) بر حسب مسافت لغزشی (S) (رابطه 1) بعنوان معیاری برای نشان دادن نرخ سایش (Q)، مورد استفاده قرار گرفته که V از طریق حاصلضرب مساحت سطح مقطع نمونه در کاهش ارتفاع ثبت شده توسط دستگاه سایش بدست آمده است.

$$Q(\text{mm}^3/\text{m}) = \frac{V}{S}$$

(1)

شکل 5 تغییرات حجم کاهش یافته تجمعی (V) بر حسب مسافت لغزش (S) را برای سرعت های سایش 6/0 و 15/0 متر بر ثانیه نشان می دهد. همانگونه که در شکل پیداست هر دو نمونه، با افزایش مسافت طی شده، کاهش حجم تجمعی بیشتری از خود نشان می دهند. از طرفی با افزایش سرعت سایش از 6/0 به 15/0 متر بر ثانیه، بطور نسبی حجم کاهش یافته، افزایش می یابد و یا به عبارتی میزان سایش



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی

مهندسی مواد، متالورژی و معدن
26 بهمن ماه 1401 - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



بیشتر می شود زیرا با افزایش سرعت ساییش، درجه حرارت در سطح تماس نمونه با صفحه ساییشی افزایش می یابد لذا سختی کاهش یافته، تغییر شکل پلاستیکی شدیدتر شده و نرخ ساییش افزایش می یابد. در محدوده 350 متر اول نمودارهای کاهش حجم تقریباً بر هم منطبق هستند که این موضوع نشان دهنده یکسان بودن مکانیزم ساییش است. در اثر افزایش مسافت لغزش، همانطور که در شکل 5 مشخص شده، تغییر شیب در نمودار مشاهده می شود که حاکی از تغییر مکانیزم غالب ساییش از خراشان به مکانیزم های تغییر شکل پلاستیک است. در شکل 6 نقشه مکانیزم ساییش Lim و [Ashby] 14، فشار نرماله اعمالی (رابطه 2) بر حسب سرعت لغزشی آمده است. محاسبات مربوط به نقشه های مکانیزم ساییش به صورت زیر است:

(2)

$$\tilde{F} = \frac{F}{A_n H_0}$$

که در آن F نیروی اعمالی و A_n سطحی که نیرو روی آن اعمال شده و H_0 سختی نمونه می باشد.

$$A_n = \pi r^2 = \pi * 9 = 28.27 \quad \& \quad H_0 = 33 \text{ Rc} \quad \& \quad F = 45 \text{ N} \rightarrow \tilde{F} = 0.048$$

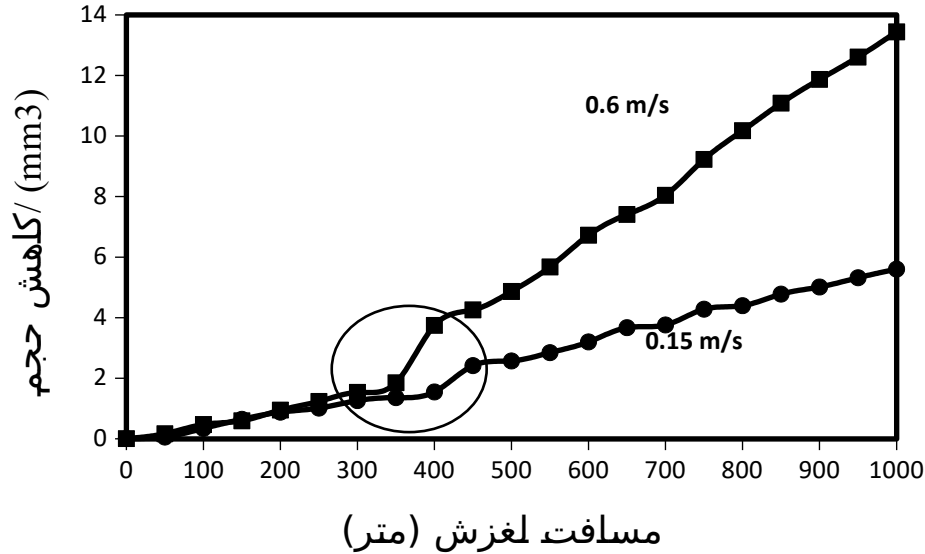
با توجه به رابطه 2 و محاسبات بدست آمده می توان دریافت که نیرو و سرعت مورد استفاده در این آزمایش و مطابقت آن با نقشه های مکانیزم ساییش موید ساییش شدید⁶ با مکانیزم ساییش تورفی⁷ می باشد. بررسی مکانیزم عمل کننده ساییش با استفاده از تصاویر سطوح ساییش یافته (شکل 7 و 8) و تصاویر زبره های ساییشی (شکل 9 و 10) امکان پذیر می شود. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی در (شکل 7 تا 10) با افزایش سرعت از 15/0 به 6/0 متر بر ثانیه، عمق ترک های سطحی و ورقه های کنده شده از سطح بیشتر گردیده است. این موضوع را می توان به تشکیل لایه ضخیم اما ترد اکسیدی نسبت داد که در اثر سرعت بالا و حرارت ایجاد شده بر سطح نمونه، شکسته شده و باعث ایجاد ترک های عمیق و در نتیجه ساییش شدید می شود [14]. در دو سرعت 15/0 و 6/0 متر بر ثانیه مکانیزم تورفی مشاهده شده در سطوح ساییشی، نشان دهنده تغییر شکل پلاستیک شدید ایجاد شده در اثر لغزش بین (نمونه) بر روی دیسک بوده که جوانه زنی و تشکیل ترکهای ریز در زیرسطح ساییده شده را موجب شده است. این ترک ها پس از تشکیل، رشد کرده و با گسترش در مناطق ضعیف (مانند فصل مشترک فازهای مارتنزیت و فریت) و یا مناطق تحت تنش شدید، بهم پیوسته و با تداوم فرایند ساییش، از سطح جدا شده و بصورت تکه های ورقه ای (شکل 9 و 10) از منطقه ساییش خارج می گردند [13]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از زبره های ساییشی در سرعت 15/0 (شکل 9) و سرعت 6/0 متر بر ثانیه (شکل 10)، که در بزرگنمایی یکسان هستند، نشان دهنده بزرگتر بودن ورقه های جدا شده در سرعت 6/0 متر بر ثانیه می باشد. همچنین جدا شدن ذرات از سطح در اثر برش پلاستیک و نیز وجود شیارهای طولی که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی دیده می شود نشان از مکانیزم های چسبندگی و میکرو شیار می باشد [14 و 13].

⁶- Severe wear

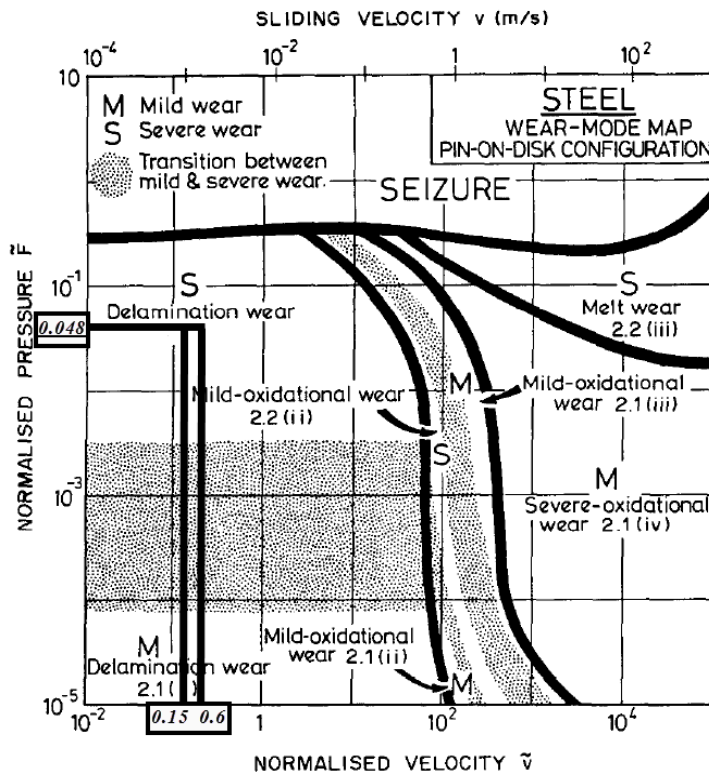
⁷- Delamination

⁸- Adhesion

⁹- Micro-Grooving



شکل 5: نمودار کاهش حجم بر حسب مسافت لغزش در سرعت 6/0 و 15/0 متر بر ثانیه



ب صنعتی صورت
مربوطه بود.
که وزن نمونه
بی درم (MΔ) از رابطه 3

3-2 سایش رفتگی
پرسی و ارزیابی رفتار
گرفت. هدف از انتخاب
مبنای ارزیابی در این ما
قبل از آزمایش M₁ و پس ا
صورت محاسبه می شود:



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی

مهندسی مواد، متالورژی و معدن
26 بهمن ماه 1401 - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023

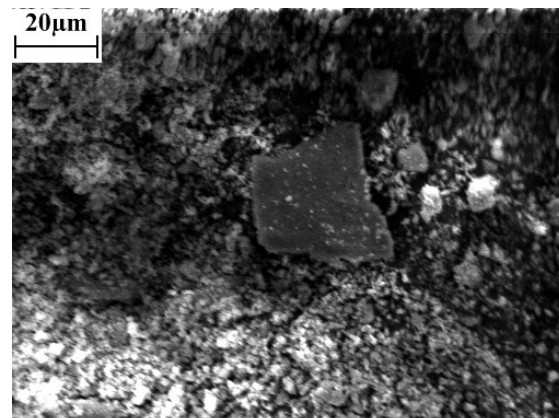
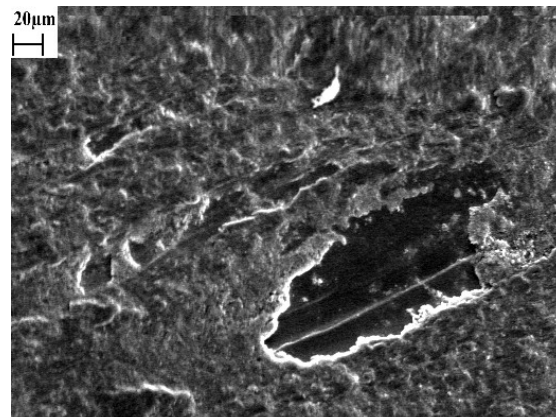
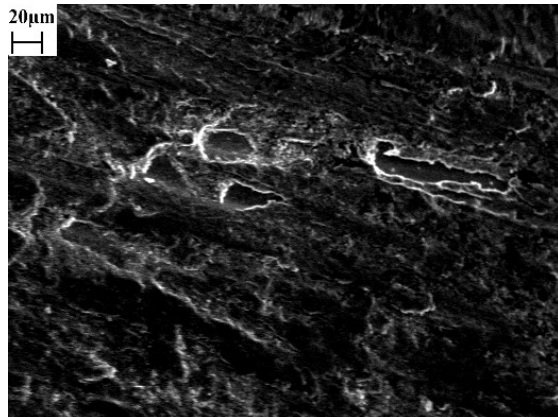


$$M(\text{mg})=M_2-M_1\Delta \quad (3)$$

شکل 10 کاهش وزن نمونه‌های رفتگی را در 3 زاویه برخورد مختلف نشان می‌دهد. برای هر زاویه برخورد، دو زمان متفاوت در نظر گرفته شد. همانطور که در شکل پیداست، بیشترین کاهش وزن در زاویه برخورد 45 درجه و کمترین کاهش وزن در زوایای برخورد کوچک 30 درجه و زاویه قائم 90 درجه به دست آمد. این نتایج با بخشی از نتایج بررسی‌های بعمل آمده توسط J.Suchánek و همکاران [15] تطابق دارد.

در زوایای برخورد 30 درجه مکانیزم تخریب سطح نسبتاً کم و از نوع تغییر شکل فشار زنی¹⁰ است و ذرات گوشه‌دار و سخت سیلیس شیارهای باریک و کم عمقی را ایجاد کردند (شکل 12). اما در زاویه 45 درجه مورفولوژی سطح رفتگی کاملاً متفاوت است و آثار رفتگی از جمله شیارهای شخم زنی، تغییر شکل برشی¹¹ بصورت حفره لبه دار¹² کاملاً مشهود و متمایز با سایر زوایای برخورد، مشاهده می‌گردد [16] که این مسئله بطور واضح در شکل 13 مشخص است. همچنین در زاویه برخورد نزدیک به 90 درجه یعنی برخورد قائم ذرات با سطح نمونه، آثار رفتگی کوپیدگی و تغییر شکل‌های سطحی نمایان می‌باشد. این تغییر شکل بصورت شبکه ای از ترک های خستگی ریز در سطح مشاهده می‌گردد [17] که مبنای این ادعا در شکل 14 واضح است.

پارامتر دیگر بررسی شده زمان برخورد است که هم براساس نمودار کاهش وزن و هم سطوح بررسی شده توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان ادعا کرد که با افزایش زمان، تغییرات در سطح شدت بیشتری یافته است. با توجه به نمودار کاهش وزن و اختلاف کاملاً محسوس بین دو نمودار زمان 5/7 ساعت و 30 ساعت می‌توان گفت که کاهش وزن زمان کم (5/7 ساعت) در مقایسه با زمان زیاد (30 ساعت) قابل چشم پوشی است. با مقایسه تصویر 14 و 15 نیز می‌توان تفاوت عمق فرورفتگی را مشاهده کرد که نشان دهنده افزایش عمق فرورفتگی در زمان 30 ساعت نسبت به زمان 5/7 ساعت است.

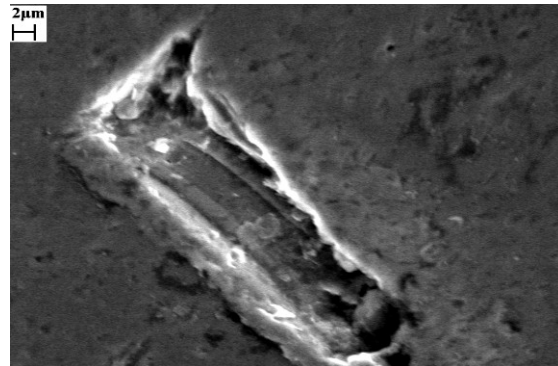
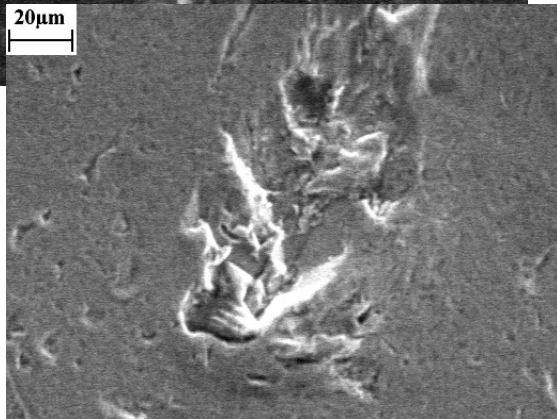
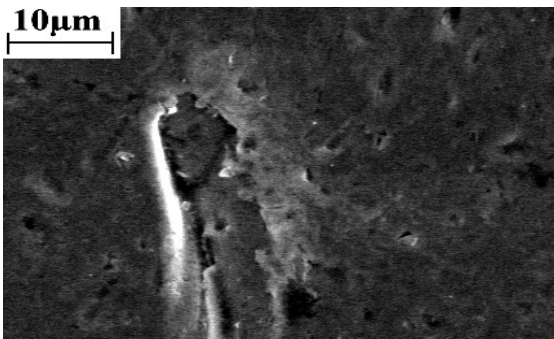
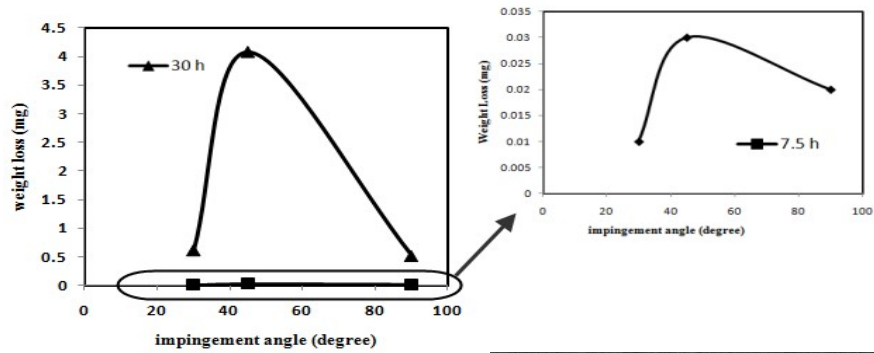


-4



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی

مهندسی مواد، متالورژی و معدن
26 بهمن ماه 1401 - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



میکروسکوپی
نمونه سایش
در 3 ساعت

میکروسکوپی
نمونه سایش
در 5,7 ساعت



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی

مهندسی مواد، متالورژی و معدن
26 بهمن ماه 1401 - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



4- نتیجه گیری

- 1) با افزایش سرعت و مسافت لغزش، میزان کاهش حجم بیشتر و سایش بیشتر می شود.
- 2) نیرو و سرعت مورد استفاده در این آزمایش نشان دهنده سایش شدید و مکانیزم سایش تورقی می باشد.
- 3) بیشترین کاهش وزن نمونه ها در اثر سایش رفتگی در زاویه برخورد 45 درجه رخ داده که در اثر مکانیزم برشی است.
- 4) افزایش زمان برخورد در سایش رفتگی باعث افزایش میزان کاهش حجم می شود.

تشکر و قدردانی

از شرکت کشت و صنعت نیشکر حکیم فارابی بخاطر حمایت مالی از پروژه و همکاری صمیمانه برای در اختیار قرار دادن پره های آسیب دیده و اطلاعات میدانی تشکر می گردد.

5- مراجع

- [1]. G.Krauss, steels heat treatment and processing principals, 1933, ASM international, USA.
- [2]. Xi Yun-tao, Liu Dao-xin, Han Dong, "Improvement of erosion and erosion-corrosion resistance of AISI420 stainless steel by low temperature plasma nitriding", Applied Surface Science, 254, 2008, 5953-5958.
- [3]. J.R.Davis, ASM Specialty Handbook stainless steel, 1994, ASM international, Materials Park, OH, USA.
- [4]. Philip D.Harvey, Engineering properties of steel, 1982, ASM international, the University of Michigan
- [5]. F.Pratesi, M.Giannozzi, E.Giorni, I. Giovannetti, and G. Zonfrillo, "Increased liquid droplet erosion resistance of steam turbine blades", Energy Materials, 2, 2007, 13-18.
- [6]. J.F.Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces", J. Appl. Phys., 24, 1953, 981-988.
- [7]. M.Ahmad, M.Casey, N.Surken, "Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials", Wear, 267, 2009, 1605-1618.
- [8]. B.Staniša, Z.Schauperl, K.Grilec, "Erosion behaviour of turbine rotor blades installed in the Krsko nuclear power plant", Wear, 254, 2003, 735-741.
- [9]. B.S.Mann, "Solid-particle erosion and protective layers for steam turbine blading", Wear, 224, 1999, 8-12.
- [10]. W.Tuckart, J.Insausti, E. Forlerer, L.Iurman, "Sliding behaviour of ion nitride AISI 420 stainless steel", Surface Engineering, 21, 2005, 463-468.
- [11]. Annual book of ASTM STANDARDS, ASTM G99-04.
- [12]. Annual book of ASTM STANDARDS, ASTM G73-98.
- [13]. I.M. Hutchings, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, 1995, London, Arnold.



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی

مهندسی مواد، متالورژی و معدن
26 بهمن ماه 1401 - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



- [14]. S.C.Lim, M.F.Ashby, J.H.Brunton, "Wear-rate transitions and their relationship to wear mechanisms", Acta metallurgy, 35, 1987, 1343-1348.
- [15]. J.Suchánek, V.Kuklíka, E.Zdravecká, "Influence of microstructure on erosion resistance of steels", Wear, 267, Issue 11, 2009, 2092-2099
- [16]. R.E.Winter and I.M.Hutchings, "solid particle erosion studies using single angular particles", Wear, 29, 1974, 181-194
- [17]. R.E.Winter and I.M.Hutchings, "The role of adiabatic shear in solid particle erosion", 34, 1975, 141- 148