

مطالعه‌ای بر تاثیر و تاثر شرایط الکتروشیمیایی سطح و رفتار اصطکاکی تحت یک سامانه تریبوخوردگی کنترل‌شده بر دو آلیاژ فولادی فعال و روئین در محیط آب نمک

محمد خوئینی^{۱*}، چنگیز دهقانپان^۲

^{۱*}دکتری مهندسی مواد، پردیس فنی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران

^۲دکتری مهندسی مواد، پردیس فنی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران

* نویسنده مسئول: Mohamad_khoeiny@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

چکیده

تخریب لایه‌های سطحی فلزات در نتیجه‌ی فعالیت هم‌زمان سایش و خوردگی، به عنوان پدیده‌ی تریبوخوردگی شناخته شده که در بسیاری از کاربردهای مهندسی مشاهده می‌شود. ارزیابی و ارائه راه کار مناسب جهت کنترل این پدیده مستلزم شناخت تاثیرات متقابل سایش و خوردگی بر یکدیگر است. در این راستا، تاثیر و تاثر رفتار الکتروشیمیایی و اصطکاکی سطح بر دو آلیاژ فولادی ساده کربنی AISI ۱۰۴۵ و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴L در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در شرایط لغزش تک‌جهته با استفاده از تریبومتر پین روی دیسک متصل به پتانسیواستات در محدوده‌ی وسیعی از پتانسیل انجام شد. دگرگونی اصطکاکی در محدوده پتانسیل‌های مختلف و متقابلاً تاثیر اصطکاک بر شاخه‌های کاتدی و آندی نمودار پلاریزاسیون تعیین گردید. نتایج نشان داد که برهم‌کنش‌های مختلفی بین فعالیت‌های الکتروشیمیایی و اصطکاکی در پتانسیل‌های مختلف برای دو آلیاژ فولادی فعال و روئین وجود دارد. نتایج به تفصیل بحث خواهد شد.

کلیدواژه: رفتار الکتروشیمیایی، رفتار اصطکاکی، هم‌افزایی، تریبوخوردگی، خوردگی فعال، آلیاژ فولادی روئین.

A Study on The Interplay of Surface Electrochemical Conditions and Frictional Behavior Under a Controlled Tribocorrosion System on Active and Passive Steel Alloys in Salt Water Environment

M. Khoeini ^{*1}, Ch. Dehghanian²

^{*1}Ph.D. in Material and Metallurgy Engineering, College of Engineering, Faculty of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran

²Ph.D in Material and Metallurgy Engineering, College of Engineering, Faculty of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran

* Corresponding Author: Mohamad_khoeiny@ut.ac.ir

Submission: 2024, 09, 11 Acceptance: 2025, 03, 19

Abstract

Destruction of the surface layers of metals as a result of the simultaneous activity of wear and corrosion is known as the phenomenon of tribocorrosion, which is observed in many engineering applications. Evaluating and providing a suitable solution to control this phenomenon requires understanding the mutual effects of wear and corrosion on each other. In this regard, the effect of the electrochemical and frictional behavior of the surface on simple carbon steel AISI 1045 and stainless steel 304L was studied in a solution of 3.5 wt. % of sodium chloride. For this purpose, the potentiodynamic polarization test was carried out in uni-directional sliding conditions using a pin-on-disk tribometer connected to a potentiostat in a wide range of potential. The frictional transformation was determined in the range of different potentials and the effect of friction on the cathodic and anodic branches of the polarization diagram was determined. The results showed that there are different interactions between electrochemical and frictional activities at different potentials for active and passive steel alloys. The results will be discussed in detail.

Keywords: Electrochemical behavior, Friction behavior, Synergism, Tribocorrosion, Active corrosion, Passive steel alloy

۱- مقدمه

تریبوخوردگی، تبدیل برگشت‌ناپذیر لایه‌های سطحی فلزات به عنوان نتیجه‌ای از برهم‌کنش‌های فیزیکی-شیمیایی و مکانیکی در طی تماس اصطکاکی در محیط‌های خورنده است [۱-۳]. تریبوخوردگی شامل تأثیرات هم‌افزایی بین فرایندهای مکانیکی، شیمیایی و الکتروشیمیایی است. آگاهی از رفتار تریبولوژیکی در غیاب مواد خورنده، و رفتار الکتروشیمیایی در غیاب سایش برای تخمین رفتار تریبوخوردگی کافی نیست. در واقع اصطکاک و سایش، حساسیت مواد به خوردگی را تغییر می‌دهند و بر عکس خوردگی شرایط اصطکاک را تغییر می‌دهد [۱-۳]. تحقیقات در زمینه تریبوخوردگی در سال ۱۹۸۰ آغاز شد و هم‌اکنون به عنوان یک میدان تحقیقاتی فعال در جهان مطرح است [۳]. با این‌حال، مطالعه این پدیده در ایران به شکل محدودی دنبال شده است. عدم شناخت و به دنبال آن عدم توانایی در مقابله بهینه با آن، سالانه خسارات هنگفتی بر پیکره صنعت وارد می‌سازد. این پدیده در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی، خودروسازی، مواد غذایی، معدن، تولید انرژی، بیومواد و ... قابل مشاهده است. جنبه کاربردی پدیده تریبوخوردگی نیز پولیش کاری شیمیایی-مکانیکی^۱ است که ساخت بسیاری از قطعات میکرومکانیک و میکروالکترونیک مهندسی، وابسته به آن است.

رفتار تریبوخوردگی نمی‌تواند به سادگی از مطالعات خوردگی الکتروشیمیایی در شرایط استاتیک و بدون اعمال بار یا با آزمون‌های سایش خشک پیش‌بینی شود، چراکه هم‌افزایی قابل‌ملاحظه و پیچیده‌ای بین سایش و خوردگی الکتروشیمیایی وجود دارد. ترکیب روش‌های الکتروشیمیایی با آزمون‌های سایش جهت مطالعه فرایندهای تریبوخوردگی و تعیین سازوکارهای سایش و خوردگی هم‌زمان، امکان‌پذیر است. این‌ها روش‌های تریبوالکتروشیمیایی نامیده می‌شوند که انواع مختلف آن توسط چندین محقق مورد استفاده و مقایسه قرار گرفته است [۴-۶]. روش‌های تریبوالکتروشیمیایی در چهار نوع اصلی قابل دسته‌بندی است [۷ و ۸]: ۱- پایش پتانسیل مدار باز،

۲- روش پتاسیواستاتیک، ۳- روش پتانسیودینامیک و ۴- روش سل گالوانیک. روش‌های دیگری شامل مطالعه نوین الکتروشیمیایی [۹ و ۱۰] و طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی [۵ و ۱۱]، محدود مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

تغییرات سطحی ایجاد شده توسط سایش می‌تواند منجر به تغییر خواص الکتروشیمیایی سطح گردد و برعکس، فعالیت الکتروشیمیایی سطح می‌تواند با ایجاد لایه‌های سطحی تریبوفعال^۲، خواص تریبولوژیکی سطح را تحت تأثیر قرار دهد [۵]. روش‌های تریبوالکتروشیمیایی ما را قادر می‌سازند تا چگونگی تحت تأثیر قرار گرفتن سینتیک واکنش‌های الکتروشیمیایی توسط سایش [۶] و همچنین، تأثیر واکنش‌های الکتروشیمیایی بر رفتار سایشی را مورد مطالعه قرار دهیم [۱۲]. فولادهای زنگ‌نزن به علت مقاومت به خوردگی عالی و خواص مکانیکی مطلوب از اهمیت فناوریانه بالایی برخوردارند. در بسیاری از موقعیت‌ها مانند کاربردهای دریایی، معدن، تولید نیرو، بیوپزشکی و فرآوری مواد غذایی، قطعات فولاد زنگ‌نزن در معرض فعالیت‌های توانمند خوردگی و سایش قرار می‌گیرند. کاهش قابل ملاحظه‌ی مقاومت به خوردگی و سایش فولادهای زنگ‌نزن در طی فرایند تریبوخوردگی توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است به طوری که بخش عمده مطالعات تریبوخوردگی در زمینه‌ی فلزات و آلیاژهای روئین بوده است [۱۳ و ۱۴]. فولادهای کربنی نیز به طور وسیعی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند و ارزش کاربردی بالایی دارند. با این‌حال، مطالعات تریبوخوردگی صورت گرفته بر فولادهای کربنی به عنوان فلزات فعال محدود است [۱۵ و ۱۶].

هدف از این پژوهش، شناخت اثرات متقابل خوردگی و سایش سطح است که می‌تواند مسیر ارزیابی و ارائه راه کارهای مهندسی جهت ارتقای عملکرد و عمر تجهیزات را هموار سازد. بررسی کیفی تأثیر اصطکاک بر رفتار الکتروشیمیایی و بالعکس، تأثیر شرایط الکتروشیمیایی سطح بر رفتار اصطکاکی، لازمه‌ی چنین شناختی است. از طریق انجام آزمون پلاریزاسیون

^۱Chemo-mechanical polishing (CMP)^۲Tribo-reactive surface layers

پتانسیودینامیک در شرایط لغزشی می‌توان هم‌زمان تاثیر شرایط الکتروشیمیایی و اصطکاک بر یکدیگر را در محدوده‌ی وسیعی از پتانسیل تعیین کرد. در این تحقیق، به این تاثیرات بر دو فولاد ساده کربنی و زنگ‌نزن در محیط خورنده‌ی آب نمک می‌پردازیم.

۲- مواد و روش تحقیق

دو نوع فولاد کربنی AISI 1045 و فولاد زنگ‌نزن AISI 304L مورد استفاده قرار گرفتند. ترکیب شیمیایی فولادهای مذکور طبق استاندارد ASTM E415 و توسط دستگاه کوانتومتری مشخص گردید که در جدول ۱ ارائه می‌گردد.

نمونه‌ها به شکل میله تهیه و به صورت دیسکی شکل به ضخامت ۵ mm و قطر ۴۵ mm آماده‌سازی شدند. دیسک‌ها با استفاده از کاغذ سنباده تا شماره ۸۰۰ سنباده‌کاری شدند. محلول آزمون، NaCl ۳/۵٪ (pH خنثی) بود که با استفاده از سدیم کلرید خلوص بالا و آب مقطر ساخته شد. جسم ساینده، گلوله آلومینایی با قطر ۷ mm بود که از شرکت سرامیک‌های صنعتی اردکان تهیه گردید. ترکیب شیمیایی و برخی از خواص فیزیکی گلوله‌های آلومینایی به ترتیب در جدول ۲ ارائه می‌گردد. نمونه‌ها و گلوله‌های آلومینایی قبل از هر آزمایش با استفاده از استون تمیزکاری شدند. همه آزمایش‌ها در دمای محیط ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) و در هوای باز انجام گردید.

آزمون‌های تریبوخوردگی با استفاده از تریبومتر پین روی دیسک تک‌جهته انجام شد. سیستم تریبوخوردگی، که از اتصال

تریبومتر به دستگاه پتانسیواستات تشکیل شده است، به طور طرح‌واره در شکل ۱ نشان داده می‌شود. نمونه‌ها در سل الکتروشیمیایی از جنس PTFE و با حجم ۱/۵ lit نصب شد. گلوله آلومینایی در انتهای شفتی از جنس PTFE سوار گردید. سطح دایره‌ای از دیسک که در معرض محلول قرار گرفت، cm^2 ۹/۶۲ و شعاع شیار سایش ۸/۵ mm بود.

در طی سایش لغزشی، نمونه دیسکی توسط موتور DC با سرعت ۶۰ rpm در تماس با گلوله ثابت می‌چرخید. نیروی عمودی ۲ N اعمال و نیروی اصطکاکی و در نتیجه ضریب اصطکاک توسط سیستم داده‌برداری کامپیوتری با فرکانس نمونه‌برداری ۱ Hz به طور پیوسته ثبت شدند. مقدار نیروی عمودی پایین به جهت آشکارسازی محسوس تر تاثیر شرایط الکتروشیمیایی سطح بر رفتار اصطکاکی انتخاب گردید.

نمونه‌های آزمون به عنوان الکتروود کاری همراه با الکتروود مرجع کالومل استاندارد و الکتروود پلاتین به عنوان الکتروود کمکی به دستگاه پتانسیواستات (مدل 68 FR 0.5 ساخت کشور آلمان) متصل شدند.

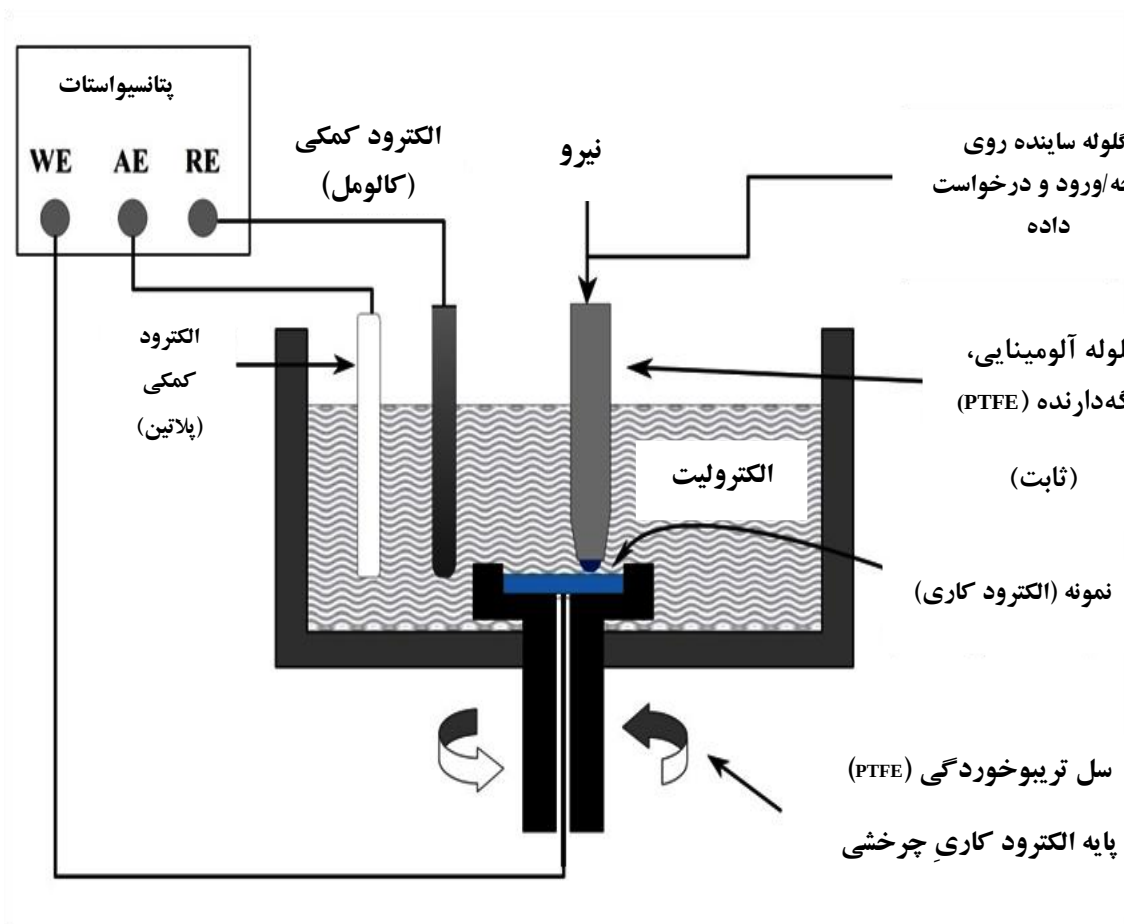
اندازه‌گیری‌های پتانسیودینامیک در حالت ایستا (بدون چرخش) و در حالت لغزشی انجام شدند. اندازه‌گیری‌های پلاریزاسیون آندی در سرعت روبش ۲ mV/s صورت گرفت. قبل از هر آزمایش، نمونه‌ها برای ۳۰ دقیقه تحت شرایط مربوطه پایدارسازی شدند. در شرایط لغزشی، اندازه‌گیری پلاریزاسیون بعد از ۳۰ دقیقه پایدارسازی پتانسیل در حالت ایستا و ۵ دقیقه لغزش شروع شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد کربنی AISI 1045 و فولاد زنگ‌نزن AISI 304L (بر حسب درصد وزنی)

Fe	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu	نمونه
پایه	۰/۴۹۱	۰/۲۴۵	۰/۵۸۳	۰/۰۲۶۹	۰/۰۰۸۷	۰/۱۱۴	۰/۱۰۵	۰/۰۱۳۴	۰/۰۲۶۶	۰/۰۲۵۵	۰/۲۴۱	AISI 1045 carbon steel
پایه	۰/۰۲۷۴	۰/۳۷۴	۱/۳۵	<۰/۰۰۰۲۰	۰/۰۴۴۶	۱۸/۰۵	۷/۹۶	۰/۰۳۶۸	۰/۰۰۷۱	۰/۱۲۸	۰/۵	AISI 304L stainless steel

جدول ۲. ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی گلوله آلومینایی نوع ADM 920

اکسید قلیایی	Fe_2O_3	SiO_2	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$	ترکیب شیمیایی (wt. %)
۴/۵	۰/۱	۳/۵	۹۲	
استحکام خردایش (Kg/ball)	تخلخل (%)	جذب آب (%)	سختی (mohs)	دانسیته بالک (gr/cm ³)
۱۳۰	۰/۲	۰/۱	۸/۹-۵	۳/۵
				مشخصه فیزیکی



شکل ۱. نمای طرح‌واره از سل تریبوالکتروشیمیایی و تجهیز آزمایشی.

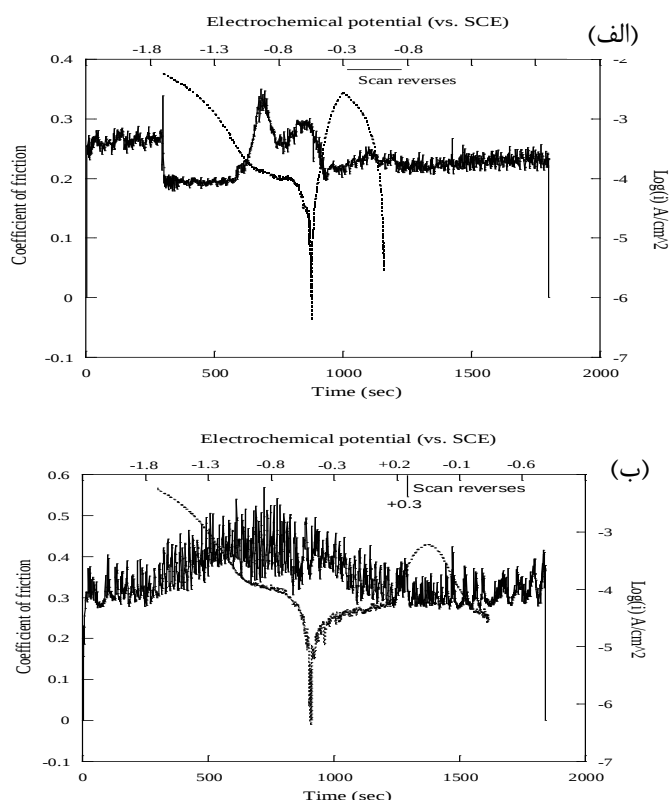
۳- نتایج و بحث

تغییرات ضریب اصطکاک متاثر از اعمال پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای دو نمونه فولاد ساده کربنی و فولاد زنگ‌نزن به ترتیب در شکل‌های ۲ (الف) و (ب) نمایش داده می‌شود. در یک نگاه کلی، همان‌طور که مشهود است، دامنه‌ی نوسانات ضریب اصطکاک برای نمونه‌ی فولاد ساده کربنی کم‌تر از نمونه‌ی زنگ‌نزن است. از طرفی، اعمال پلاریزاسیون، تغییر در دامنه‌ی نوسانات ضریب اصطکاک فولاد ساده کربنی ایجاد می‌کند در حالی که تاثیر چندانی بر نوسانات ثبت شده از ضریب اصطکاک فولاد زنگ‌نزن ندارد.

با شروع پلاریزاسیون در -1700 mV/SCE ، دو نوع روند برای تغییر ضریب اصطکاک مشاهده می‌گردد. برای نمونه‌ی فولاد ساده کربنی، به محض اعمال پلاریزاسیون، ضریب اصطکاک از میانگین $0/26$ به $0/19$ سقوط می‌کند و در محدوده پتانسیل احیای آب با دامنه‌ی نوسانات کم‌تر، ثابت باقی می‌ماند. در مقابل، با شروع پلاریزاسیون برای نمونه‌ی فولاد زنگ‌نزن، ضریب اصطکاک از میانگین $0/32$ تدریجاً شروع به افزایش کرده و با نزدیک شدن به پایان محدوده‌ی پتانسیل احیای آب در تقریباً -1120 mV/SCE ، به بیشینه مقدار خود در حدود $0/44$ می‌رسد.

با گذر از محدوده پتانسیل احیای آب، احیای اکسیژن به عنوان واکنش اصلی کاتدی ادامه می‌یابد. در این ناحیه پتانسیل، ضریب اصطکاک نمونه‌ی فولاد ساده کربنی با شیب تندی افزایش یافته و سریعاً به بیشینه مقدار خود در حدود $0/33$ می‌رسد. در این محدوده پتانسیل، دامنه‌ی نوسانات ضریب اصطکاک نیز افزایش می‌یابد. قبل از رسیدن به پتانسیل خوردگی، افت ضریب اصطکاک با شیب نسبتاً تند به حدود $0/26$ را شاهد هستیم که هم‌زمان با افزایش جریان انحلال آندی فولاد ساده کربنی است [۱۶]. برای نمونه‌ی فولاد زنگ‌نزن، در طول این محدوده پتانسیل تا رسیدن به پتانسیل خوردگی، ضریب اصطکاک همراه با مقدار جزئی افزایش در دامنه‌ی نوسانات، در همان مقدار بیشینه ثابت باقی می‌ماند.

با ورود به شاخه‌ی آندی، ضریب اصطکاک فولاد ساده کربنی، با شیب نسبتاً تندی مجدد کاهش یافته و در حدود $0/22$ تثبیت می‌شود. با معکوس شدن پتانسیل اعمالی در -300 mV/SCE ، تغییر چندانی در ضریب اصطکاکی اتفاق نمی‌افتد و با اتمام پلاریزاسیون، ضریب اصطکاک در حدود $0/23$ تقریباً ثابت باقی می‌ماند. برای نمونه‌ی فولاد زنگ‌نزن، با ورود به شاخه‌ی آندی، ضریب اصطکاک به تدریج شروع به کاهش کرده و به حدود $0/32$ می‌رسد. در ادامه، با معکوس شدن پتانسیل اعمالی در $+300 \text{ mV/SCE}$ ، تغییر چندانی در ضریب اصطکاکی اتفاق نمی‌افتد و پس از پایان پلاریزاسیون، ضریب اصطکاک مشابه با قبل از شروع پلاریزاسیون، در حدود $0/32$ تقریباً ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۲. منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (منحنی نقطه چین)
(الف) فولاد ساده کربنی AISI 1045 و (ب) فولاد زنگ‌نزن 304L
در شرایط لغزشی در محیط آب نمک و تاثیر آن بر تغییرات
ضریب اصطکاک (نمودار خط پر).

با ورود به شاخه‌ی آندی، روئینگی سطح با شدت بیش‌تر اتفاق می‌افتد و فیلم روئین، توانایی نقش‌آفرینی به عنوان روان‌کار یافته و در نتیجه، ضریب اصطکاک و دامنه‌ی نوسانات آن کاهش می‌یابد [۱۹].

تغییرات شاخه‌ی کاتدی و آندی متأثر از سایش لغزنده طی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای دو نمونه‌ی فولاد ساده کربنی و فولاد زنگ‌نزن به ترتیب در شکل‌های ۳ (الف) و (ب) نمایش داده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، خوردگی فولاد ساده کربنی از نوع فعال بوده و هیچ‌گونه ناحیه پتاسیل روئین شدن در شاخه آندی خود نشان نمی‌دهد. در حالی که، خوردگی فولاد زنگ‌نزن از نوع غیرفعال بوده و دارای محدوده پتانسیل روئین شدن وسیعی است.

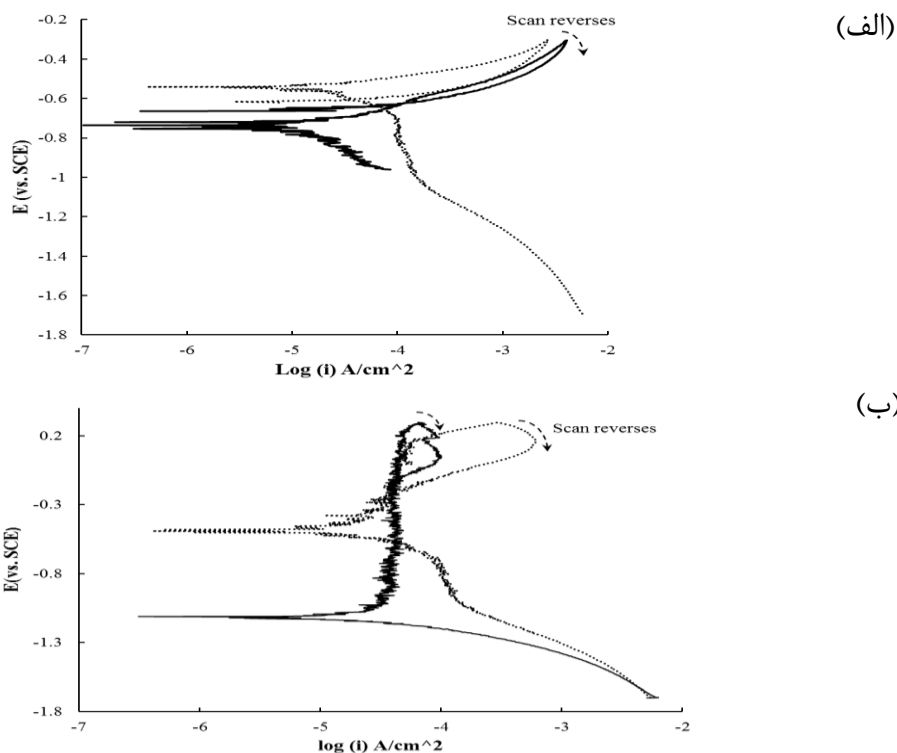
برای نمونه‌ی فولاد ساده کربنی، سایش در حالی که تاثیر چندانی بر شاخه آندی ندارد سبب انتقال قابل ملاحظه‌ی شاخه کاتدی به جریان‌های بالاتر شده و در نتیجه منجر به افزایش پتانسیل خوردگی و جریان خوردگی شده است. بر اساس حلقه‌ی تشکیل یافته از پلاریزاسیون معکوس، فولاد ساده کربنی در شرایط ایستا، متحمل خوردگی موضعی نخواهد شد. در حالی که، در شرایط سایشی، خوردگی حفره‌ای اتفاق خواهد افتاد.

در مورد فولاد زنگ‌نزن، در اثر سایش، شاخه‌ی کاتدی به جریان‌های بالاتر منتقل شده، پتانسیل خوردگی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. در حالی که، جریان خوردگی، به طور مختصر افزایش می‌یابد. انحلال آندی در شرایط سایشی رفتار شبه غیرفعال دارد و با افزایش پتانسیل، بر جریان به طور تدریجی افزوده می‌گردد. تحت سایش، پتاسیل شکست فیلم روئین، کمی پایین‌تر است و حلقه‌ی بزرگ‌تری در طی پلاریزاسیون معکوس شکل می‌گیرد. با این حال، همانند حالت ایستا، فولاد زنگ‌نزن در شرایط سایش لغزنده نیز مقاوم به خوردگی موضعی است. خلاصه‌ای از تاثیر سایش بر مشخصه‌های خوردگی فولادهای ساده کربنی و زنگ‌نزن در جدول ۳ ارائه شده است.

سازوکار غالب سایش در شرایط لغزش گلوله‌ی آلومینا بر سطح فولاد در نیروی اعمالی ۲ N و در محیط الکترولیت آب نمک از نوع خراشان است. با شروع پلاریزاسیون در -1700 mV/SCE ، احیای آب و تولید گسترده‌ی حباب‌های هیدروژن سبب ایجاد فشار هیدرودینامیکی رو به بالا در ناحیه‌ی تماس گلوله‌ی ساینده و سطح فولاد شده و در نتیجه‌ی تقلیل نیروی عمودی خالص و کاهش سطح تماس، افت ضریب اصطکاک و کاهش دامنه نوسانات اتفاق می‌افتد. این حالت مشابه روان‌کاری هیدرودینامیکی است [۴ و ۱۷]. اما در مورد فولاد زنگ‌نزن، با شروع پلاریزاسیون و تولید گاز هیدروژن، روئینگی سطح از بین رفته و در نتیجه‌ی تماس مستقیم گلوله آلومینا با سطح، ضمن افزایش جزئی در دامنه‌ی نوسانات، افزایش میانگین ضریب اصطکاک را شاهد هستیم. بم شدن صدای لغزش در این شرایط هم‌گویای همین تغییرات است.

با اتمام محدوده پتانسیل احیای آب و حذف فشار هیدرودینامیکی گاز هیدروژن تولیدی، ضریب اصطکاک فولاد ساده کربنی به سرعت افزایش می‌یابد. از آنجایی که انحلال آندی همچنان ناچیز است، تماس گلوله‌ی ساینده با سطح تمیز فولاد اتفاق افتاده و سایش خراشان شدیدترین حالت خود را تجربه می‌کند. این، سبب رسیدن ضریب اصطکاک به بیشینه مقدار خود همراه با افزایش دامنه‌ی نوسانات می‌شود. در ادامه، هم‌زمان با افزایش نرخ انحلال آندی و تشکیل محصولات خوردگی، تماس خالص بین گلوله‌ی ساینده و سطح، کاهش یافته و در نتیجه، ضریب اصطکاک مجدد کاهش می‌یابد. با ورود به شاخه‌ی آندی و تسریع انحلال سطح، محصولات خوردگی به عنوان روان‌کار، نقش‌آفرینی کرده و ضریب اصطکاک را بیش‌تر کاهش می‌دهند [۵ و ۱۸].

با اتمام تولید گاز هیدروژن در پتانسیل‌های بالاتر از پتانسیل احیای آب، روئینگی سطح فولاد زنگ‌نزن هنوز ضعیف بوده و تماس مستقیم گلوله ساینده با سطح، ضریب اصطکاک بیشینه همراه با کمی افزایش در دامنه‌ی نوسانات را رقم می‌زند.



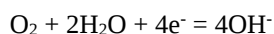
شکل ۳. منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (الف) فولاد ساده کربنی AISI 1045 و (ب) فولاد زنگ‌نزن 304L در شرایط ایستا (منحنی خط پر) و تحت لغزش (منحنی نقطه چین) در محیط آب نمک.

جدول ۳. مشخصه‌های خوردگی فولادهای ساده کربنی و زنگ‌نزن تحت شرایط ایستا و لغزش

نمونه	شرایط	نوع خوردگی	خوردگی موضعی	E_{corr} (vs. SCE)	i_{corr}^* ($\mu A/cm^2$)
AISI 1045 carbon steel	ایستا	فعال	اتفاق نمی‌افتد	-۷۴۰	۱۰
	لغزشی	فعال	اتفاق می‌افتد	-۵۴۲	۱۹
AISI 304L stainless steel	ایستا	غیر فعال	اتفاق نمی‌افتد	-۱۱۰۰	۲۵
	لغزشی	شبه-غیر فعال	اتفاق نمی‌افتد	-۴۸۰	۳۲

* دانسیته جریان‌های خوردگی توسط برون‌یابی تافل استاندارد از منحنی‌های پلاریزاسیون به دست آمده است.

پلاریزاسیون پتانسیل بر حسب جریان، آشکار می‌گردد. بنابراین، خوردگی توسط نفوذ اکسیژن به سطح فولاد کنترل شده و انتقال جرم، فرایند تعیین‌کننده‌ی سرعت واکنش الکتروشیمیایی خواهد بود. در شرایط لغزشی، حرکت دیسک سبب به هم خوردن محلول می‌گردد. زمانی که محلول به حرکت در می‌آید، واکنش کاتدی در نتیجه‌ی افزایش انتقال و تحویل اکسیژن به سطح، تسریع می‌گردد [۲۰].



(معادله ۱)

در بررسی تاثیر لغزش بر رفتار پلاریزاسیون الکتروشیمیایی فولادها، دو موضوع را بایستی در نظر داشت: ۱- حرکت محلول ناشی از چرخش دیسک، ۲- تغییرات سطح نمونه در اثر سایش لغزشی. در محلول آب نمک، واکنش کاتدی، احیای اکسیژن (معادله ۱) است که منجر به مصرف این گونه‌ی محلول در مجاور سطح نمونه می‌گردد. انحلال‌پذیری اکسیژن در آب نسبتاً پایین است (حدود ۸ ppm در دمای اتاق) و این موضوع سبب ایجاد پلاریزاسیون غلظتی شده که به صورت شیب تند منحنی

همچنین در پتانسیل‌های پایین‌تر از -1120 mV/SCE، واکنش الکترولیز آب (معادله ۲) صورت می‌گیرد [۴]. تشکیل حباب‌های گاز هیدروژن بر روی سطح فولاد به عنوان محصول واکنش و خروج آن‌ها از نقطه نظر سینتیکی فرایندی کند است و این خود سبب ایجاد پلاریزاسیون هیدروژنی می‌گردد. لغزش مکانیکی سبب تسهیل خروج حباب‌های هیدروژن از سطح فولاد شده و در نتیجه، واکنش احیای آب را تسریع می‌کند [۲۱].



سایش لغزشی همچنین سبب حذف لایه‌های سطحی (شامل محصولات خوردگی، لایه‌های جذبی، فیلم روئین و ...) و تغییرات مکانیکی سطح (ایجاد ناهنجاری، زبری و مواضع فعال سطحی، افزایش سطح در معرض محلول و ...) می‌گردد. این تغییرات سطح معمولاً انحلال آندی را تسریع می‌کنند. همان‌طور که در بالا بحث شد، در شرایط لغزشی، واکنش‌های احیای اکسیژن و احیای آب تسریع شده و این سبب می‌شود که شاخه کاتدی شدیداً به مقادیر دانسیته جریان بالاتر انتقال یابد. همچنین، سینتیک انحلال آندی می‌تواند توسط لغزش تسریع

شود. با این حال، انحلال فعال فولاد ساده کربنی چندان متأثر از لغزش نبوده و در نتیجه، تأثیر مهمی بر شاخه آندی نگذاشته است. این سبب شده است که پتانسیل خوردگی فولاد ساده کربنی در شرایط لغزشی به مقادیر مثبت انتقال یافته و دانسیته جریان خوردگی نسبتاً زیادی را تجربه کند. این افزایش قابل ملاحظه‌ی جریان خوردگی سبب شده تا سطح فولاد ساده کربنی نسبت به خوردگی موضعی دیگر مقاومت نشان ندهد و دچار خوردگی حفره‌ای گردد.

در مقابل، انحلال غیرفعال فولاد زنگ‌نزن بیش‌تر متأثر از لغزش است. لغزش منجر به تخریب موضعی فیلم روئین سطح شده که به طور پیوسته در حال تخریب و تشکیل مجدد است [۴ و ۹]. این، شرایط انحلال شبه غیرفعال را بر سطح فراهم می‌کند. با این حال، به دلیل تشکیل ناحیه‌ی روئین در محدوده‌ی وسیع پتانسیل، لغزش سبب انتقال شدید پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر مثبت شده و افزایش نسبتاً کوچک دانسیته جریان خوردگی را به دنبال داشته است. این افزایش پتانسیل هنوز در حدی نیست که منجر به افت قابلیت ترمیم فیلم روئین گردد و سطح فولاد زنگ‌نزن همچنان مقاوم به خوردگی موضعی است.

۴- نتیجه‌گیری

دانسیته جریان الکتروشیمیایی و تغییرات ضریب اصطکاک به طور هم‌زمان برای سطوح فولادهای فعال و روئین در شرایط لغزشی طی آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده‌ی وسیعی از پتانسیل‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده:

- کاهش ضریب اصطکاک و دامنه‌ی نوسانات آن برای فولاد ساده کربنی متأثر از ۱- تولید گاز هیدروژن در محدوده پتانسیل احیای آب و ۲- تشکیل محصولات خوردگی ناشی از انحلال سطح است. این کاهش برای فولاد زنگ‌نزن ناشی از تشکیل فیلم روئین در محدوده پتانسیل مدار باز و پتانسیل‌های آندی است که در نقش روان کار ظاهر می‌گردد. در مقابل، افزایش ضریب اصطکاک و دامنه‌ی نوسانات آن برای فولاد ساده کربنی در محدوده پتانسیل احیای اکسیژن و در شرایط انحلال ناچیز آندی رخ می‌دهد. در مورد فولاد زنگ‌نزن، این افزایش در هر دو محدوده پتانسیل‌های احیای اکسیژن و احیای آب که فیلم روئین سطح تضعیف و تخریب شده اتفاق می‌افتد.

- ایجاد تلاطم در محلول در نتیجه لغزش سبب غلبه بر پلاریزاسیون هیدروژن و پلاریزاسیون غلظتی اکسیژن شده و شاخه‌ی کاتدی را به جریان‌های بالاتر انتقال می‌دهد. با این حال، لغزش تأثیر چندانی بر انحلال فعال فولاد ساده کربنی نداشته و سبب ایجاد شرایط انحلال شبه فعال بر سطح فولاد زنگ‌نزن می‌گردد. بر این اساس، ضمن افزایش پتانسیل خوردگی فولاد ساده کربنی در طی لغزش، جریان خوردگی آن افزایش چشم‌گیر پیدا کرده و سطح آن مستعد به خوردگی حفره‌ای خواهد شد. این در حالی است که برای فولاد زنگ‌نزن، هر چند افزایش پتانسیل خوردگی در شرایط لغزشی بزرگ بوده ولی، جریان خوردگی افزایش زیادی ندارد و سطح فولاد همچنان مقاوم به خوردگی موضعی خواهد بود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از اعضای تیم طراح و سازنده دستگاه آزمون تریبوخوردگی در آزمایشگاه خوردگی و پوشش دانشکده متالورژی و مواد دانشگاه تهران کمال تشکر دارند.

مراجع

- [1] A.I. Munoz, N. Espallargas, and S. Mischler, Tribocorrosion, Springer, 2020.
- [2] V.I. Pokhmurs' Kyi, V.M. Dovhunyk, Tribocorrosion of stainless steels (Review), Materials Science, Vol. 46, No. 1, 2010, Pp. 87-96.
- [3] R.J.K. Wood, Tribo-corrosion of coatings: a review, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 40, No. 18, 2007, Pp. 5502-5521.
- [4] S. Mischler, Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: A comparative evaluation, Tribology International, Vol. 41, No. 7, 2008, Pp. 573-583.
- [5] P. Ponthiaux, F. Wenger, D. Drees, J.-P. Celis, Electrochemical techniques for studying tribocorrosion processes, Wear, Vol. 256, No. 5, 2004, Pp. 459-468.
- [6] D. Landolt, S. Mischler, and M. Stemp, Electrochemical methods in tribocorrosion: a critical appraisal. Electrochimica Acta, Vol. 46, No. 24-25, 2001, Pp. 3913-3929.
- [7] M. Keddam, F. Wenger, Tribocorrosion of passive metals and coatings, Elsevier, 2011, Pp. 187-221.
- [8] S.B. Arya, and F.J. Joseph, Tribocorrosion, Elsevier, 2021, Pp. 43-77.
- [9] P.-Q. Wu, and J.-P. Celis, Electrochemical noise measurements on stainless steel during corrosion-wear in sliding contacts, Wear, Vol. 256, No. 5, 2004, Pp. 480-490.
- [10] A. Berradja, D. Deforge, R.P. Nogueira, P. Ponthiaux, F. Wenger, and J.-P. Celis, An electrochemical noise study of tribocorrosion processes of AISI 304 L in Cl^- and SO_4^{2-} media, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 39, No. 15, 2006, Pp. 3184-3192.
- [11] A.C. Fernandes, F. Vaz, E. Ariza, L.A. Rocha, A.R.L. Ribeiro, A.C. Vieira, J.P. Riviere, L. Pichon, Tribocorrosion behaviour of plasma nitrided and plasma nitrided+ oxidised Ti6Al4V alloy, Surface & Coatings Technology, Vol. 200, No. 22-23, 2006, Pp. 6218-6224.
- [12] D. Landolt, Electrochemical and materials aspects of tribocorrosion systems, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 39, No. 15, 2006, Pp. 3121.
- [13] Y. Sun, and E. Haruman, Tribocorrosion behaviour of low temperature plasma carburised 316L stainless steel in 0.5 M NaCl solution, Corrosion Science, Vol. 53, No. 12, 2011, Pp. 4131-4140.
- [14] M.R. Batani, J.A. Szpunar, X. Wange, D.Y. Li, Wear and corrosion wear of medium carbon steel and 304 stainless steel, Wear, Vol. 260, No. 1-2, 2006, Pp. 116-122.
- [15] B. Zhang, J. Wang, H. Liu, Y. Yan, P. Jiang, and F. Yan, Tribocorrosion properties of AISI 1045 and AISI 2205 steels in seawater: Synergistic interactions of wear and corrosion, Friction, Vol. 9, No. 5, 2021, Pp. 929-940.
- [16] E.E. Stansbury, and R. Buchanan, Fundamentals of electrochemical corrosion, ASM international, 2000.
- [17] G. Stachowiak, and A.W. Batchelor, Engineering tribology, Butterworth-heinemann, 2013.
- [18] A. López-Ortega, J.L. Arana, and R. Bayón, Tribocorrosion of passive materials: a review on test procedures and standards, International Journal of Corrosion, Vol. 2018, No. 1, 2018, Article ID 7345346.
- [19] Y. Sun, V. Rana, Tribocorrosion behaviour of AISI 304 stainless steel in 0.5 M NaCl solution, Materials Chemistry and Physics, Vol. 129, No. 1-2, 2011, Pp. 138-147.
- [20] S. Yin, and D.Y. Li, A new phenomenon observed in determining the wear-corrosion synergy during a corrosive sliding wear test, Tribology Letters, Vol. 29, No. 1, 2008, Pp. 45-52.
- [21] Z. Wang, Y. Yan, Y. Su, L. Qiao., Effects of stirring action during friction on electrode processes of AISI 304 stainless steel in sulphuric acid, Electrochimica Acta, Vol. 298, 2019, Pp. 756-769.