

بررسی تاثیر ذرات گرافیت و MoS_2 بر خواص تریبولوژیکی پوشش کامپوزیتی Ni-SiC در دماهای بالا

محمد فاضل^{۱*}، محمدرضا گرسویز جزی^۱، سعید بهرامزاده^۲، سعیدرضا بخشی^۳، مظاهر رضانی^۳ و احمد بهرامیان^۳

۱. دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲. دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه تهران، تهران

۳. دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۷/۱۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۲/۱۴)

چکیده - پوشش کامپوزیتی Ni-SiC، یکی از پوشش‌هایی است که برای فراهم نمودن مقاومت سایشی مناسب، در بسیاری از کاربردها نظیر سیلندرها، موتورهای احتراق و قالب‌های ریخته‌گری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش، پوشش‌های Ni-SiC، Ni-SiC-MoS₂ و Ni-SiC-Gr استفاده هم‌زمان از دو هم‌زن مکانه و فراصوت در حمام سولفامات نیکل ایجاد. با توجه به دمای کاری موتور، آزمون‌ها در محدوده دما ۰۰ - درجه سانتی‌گراد انجام و رفتار تریبولوژیکی آنها در دماهای گوناگون ارزیابی. بر اساس آزمون‌های پوشش در دماهای ۰۰ و ۰۰ درجه سانتی‌گراد، ضریب اصطکاک‌های و نزدیک هم نشان می‌دهند. با افزایش دمای ۰۰ درجه سانتی‌گراد، ضریب اصطکاک پوشش Ni-SiC شدت افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزودن ذرات روان‌کار در این دماها، ضریب اصطکاک را دارد.

واژگان کلیدی: رسوب‌دهی، زمان، پوشش کامپوزیتی Ni-SiC، ذرات روان‌کار جامد، رفتار تریبولوژیکی

Influence of Gr and MoS₂ Particles on High Temperature Tribological Properties of Ni-SiC Composite Coating

M. Fazel^{1*}, M.R. Garsivaz Jazi¹, S. Bahramzadeh², S.R. Bakhshi³, M. Ramazani³ and A. Bahramian³

1. Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

2. Department of Materials Engineering, University of Tehran, Tehran

3. Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahinshahr

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m_fazel2012@yahoo.com

Abstract: *Ni-SiC composite coatings are successfully employed as a protective coating in the inner walls of engine cylinders. In this study, Ni-SiC, Ni-SiC-MoS₂ and Ni-SiC-Gr composite coatings were prepared from a sulfamate bath. Both mechanical and ultrasonic stirring were used simultaneously during the process. Taking into account the working temperature of engine cylinders, the wear behavior of coatings was evaluated at 25 to 300 °C and the high temperature tribological properties of the coatings were investigated. Based on the results obtained from the wear tests, all three coatings showed almost good friction coefficient values at 25 and 100 °C, which were close to each other. By increasing the temperature to 200-300 °C, the friction coefficient and weight loss values strongly increased. However, addition of solid lubricants caused the values to decrease. The Ni-SiC-Gr coating at all temperatures showed a good and stable behavior.*

Keywords: *Co-deposition, Ni-SiC composite coating, Solid lubricant particles, Tribological behavior*

مقدمه

دیرگداز) مورد استفاده قرار گیرند [۵ و ۶].

در این بین پوشش‌های کامپوزیتی Ni-SiC به دلیل حضور ذرات سخت SiC، به عنوان یکی از جدی‌ترین گزینه‌ها در کاربردهای سایشی مطرح هستند. معمولاً برای بهبود رفتار سایشی و جلوگیری از ایجاد اصطکاک شدید، در کنار این پوشش‌ها، از روان‌کارهای مایع نیز استفاده می‌شود. اما در مواردی ممکن است به دلایل گوناگون، یک روان‌کار مایع نتواند به خوبی نقش ایفا کند که این مساله سبب می‌شود پوشش تا اندازه زیادی آسیب ببیند. هم‌چنین در مواردی که نیاز به استفاده از این پوشش‌ها در خلا است نیز نمی‌توان از روان‌کار مایع استفاده کرد. مجموعه‌ی این دشواری‌ها نیاز به استفاده از ذرات روان‌کار جامد در پوشش را شدت می‌بخشد. هم‌چنین به دلیل این که در بسیاری از کاربردها، نظیر سیلندرها، موتورهای احتراق و قالب‌های ریخته‌گری، پوشش در دماهای نسبتاً بالا قرار دارد، لازم است انتخاب روان‌کار به گونه‌ای باشد که بتواند در دماهای بالا نیز خواص خود را نگه دارد [۵].

از بین روان‌کارهای گوناگون، گرافیت و MoS₂ روان‌کارهای جامد مهمی با ساختار لایه‌ای هستند [۷ و ۸]. این مواد می‌توانند به راحتی در جهت موازی با لایه‌ها بریده شوند و نقش روان‌کاری خود را به خوبی انجام دهند [۹ و ۱۰]. در مجموع در مواردی که روغن یا گریس نمی‌تواند استفاده شود و یا تحمل بار کافی ندارند، این روان‌کارهای جامد به دلیل پایداری شیمیایی و گرمایی بالا، می‌توانند بسیار پرکاربرد و مفید باشند [۱۰].

پیشرفت فناوری موجب شده است که نیاز به مواد فلزی با خواص سطحی بهتر به گونه روزافزونی احساس شود. از این رو با گسترش علم مواد، مواد مهندسی با ساختارهای جدید و کارکردهای ویژه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۱]. در این میان استفاده از ذرات تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی از جمله روش‌هایی است که می‌تواند افزون بر بهبود خواص تریبولوژیکی و سطحی، سایر مشخصات فلز نظیر خواص فیزیکی، مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی و مقاومت خوردگی را نیز به گونه چشم‌گیری بهبود بخشد [۲]. روش‌های گوناگونی برای ایجاد پوشش‌های کامپوزیتی وجود دارد که در بین آن‌ها رسوب‌دهی الکتروشیمیایی در چند دهه‌ی اخیر بسیار مورد توجه بوده است. دلیل این مطلب را می‌توان قیمت پایین، سادگی و تاثیرپذیری بالای فرایند، قابلیت انجام در دماهای نزدیک به دمای محیط و هم‌چنین توانایی بهبود خواصی نظیر مقاومت سایشی و مقاومت به خوردگی دانست [۳ و ۴].

در میان فلزات گوناگون، نیکل با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی بی‌همتایش، اولین فلزی بود که در صنعت آب‌کاری به عنوان پوشش به کار برده شد [۱]. با این وجود، پوشش‌هایی که تنها شامل نیکل بودند، جواب‌گوی همه‌ی نیازمندی‌ها نبودند. این موضوع سبب شد نگاه‌ها به استفاده از پوشش‌های کامپوزیتی زمینه‌ی نیکل سوق کرده، این پوشش‌ها به گونه‌ای گسترده در ریزالمنت‌های الکترونیکی، لایه‌های خودروان‌کار، سیلندرهای موتور و پوشش‌های مقاوم به گرما (پوشش‌های

جدول ۱- ترکیب حمام آب کاری

غلظت (g/lit)	ترکیب مورد استفاده
۳۵۰	نیکل سولفامات
۱۵	کلرید نیکل
۳۵	اسید بوریک

ریخته گری و سیلندرهای پیستونی، دارند. هدف از این پژوهش ایجاد پوشش کامپوزیتی Ni-SiC در شرایط حضور و نبود ذرات روان کار جامد MoS_2 و گرافیت و ارزیابی رفتار تریبولوژیکی این پوشش‌ها در دماهای گوناگون است.

مواد و روش آزمایش

تهیه پوشش‌ها

ابتدا دیسک‌هایی به قطر ۶۵ میلی‌متر و ضخامت ۷/۵ میلی‌متر از جنس فولاد St37 تهیه شد. برای از بین بردن ناهمگونی‌های ناشی از تراش و مشکل ناموازی بودن سطوح، عملیات سنگ‌زنی از دو سمت تا ضخامت ۷/۲ میلی‌متر انجام گرفت. پس از انجام گام‌های اولیه، شامل ماسک کردن نمونه‌ها، ماسه‌زنی، چربی‌زدایی در محلول چربی‌گیر TURKO و اسیدشویی در محلول ۱ مولار اسید سولفوریک، عملیات آب کاری بر روی یک سطح نمونه و در حمام سولفامات نیکل با ترکیب برابر جدول ۱ انجام گرفت.

برای انحلال و پراکنده‌سازی هرچه یکنواخت‌تر ذرات ثانویه در محلول، عملیات هم‌زنی به دو صورت مکانیکی و فراصوت (آلتراسونیک) به‌طور هم‌زمان در طول فرایند انجام گرفت. هم‌زن مکانیکی مورد استفاده، با سرعتی نزدیک به ۴۰۰ دور بردقیقه در نزدیکی آند قرار گرفت تا از تاثیرات منفی آن بر نشست ذرات در گام‌های نخست، روی سطح کاتد جلوگیری شود. ضمن این‌که عملیات پوشش‌دهی درون محفظه فراصوت انجام گرفت. سایر شرایط فرایند به‌همراه غلظت ذرات و افزودنی‌های مورد استفاده در جدول ۲ مشخص شده‌اند.

در این میان MoS_2 برای روان کاری نیاز به جذب بخار نداشته و همین مساله موجب شده تا بتوان از این ماده در خلا و دماهای بالا که استفاده از گرافیت ممکن نیست، بهره برد. MoS_2 در دمای $350^\circ C$ شروع به اکسیدشدن در هوا می‌کند، اگرچه در مدت زمان‌های کوتاه می‌تواند تا دماهای بیش از $450^\circ C$ نیز مورد استفاده قرار گیرد.

استفاده از ذرات گرافیت نیز در پوشش‌های کامپوزیتی نیکل، می‌تواند ضریب اصطکاک را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. دلیل این مساله را می‌توان در جدا شدن این ذرات هنگام فرایند سایش و تشکیل یک لایه‌ی گرافیتی بین سطح پوشش و جسم ساینده دانست. گرافیت نیز همانند MoS_2 ضریب اصطکاک را در دماها و نرخ‌های سایش بالا، ثابت نگه می‌دارد. این خاصیت گرافیت را به‌عنوان گزینه‌ای مهم در بسیاری از کاربردهای سایشی مطرح می‌سازد [۱۱ و ۱۲]. با این وجود، خواص روان‌کنندگی گرافیت بستگی به حضور بخارات قابل تراکم دارد، در حالی‌که مقادیر بالای رطوبت هوا، بر خلاف گرافیت، روی اصطکاک و نرخ سایش MoS_2 تاثیر مخرب دارد [۱۳].

هرچند تاثیر حضور ذرات MoS_2 بر رفتار سایشی پوشش‌های کامپوزیتی و بهینه‌سازی شرایط آب کاری در این پوشش‌ها [۱۴-۱۶] و هم‌چنین رفتار سایشی پوشش‌های خالص و کامپوزیتی نیکل در حضور گرافیت در شرایط گوناگون آب کاری [۱۷ و ۱۸] پیش از این بررسی شده است، بررسی رفتار سایشی این پوشش‌ها و تاثیر حضور ذرات روان کار جامد در دماهای بالا چندان مورد توجه نبوده است. حال آن‌که این پوشش‌ها کاربردهای زیادی در دماهای بالا، نظیر قالب‌های

جدول ۲. افزودنی‌های حمام و شرایط فرایند آب‌کاری

حجم محلول	۵ lit
آند	نیکل خالص تجاری
غلظت SiC (۲-۳ μm)	۱۲ g/lit
غلظت MoS ₂ (* (۱۰ μm)	۱۲ g/lit
غلظت Gr (** (۱۰ μm)	۱۲ g/lit
غلظت افزودنی مسطح‌ساز	۰/۵ cm ³ /lit
غلظت افزودنی کاهنده تنش	۲/۵ cm ³ /lit
سرعت هم‌زن مکانیکی	۴۰۰ - ۴۲۰ rpm
چگالی جریان آب‌کاری	۵ A/dm ²
دمای حمام	۵۰ - ۵۵ °C
pH	۴/۰ - ۴/۶

* و **: مخصوص نمونه‌های دارای ذرات روان‌کار جامد

جدول ۳- شرایط آزمون سایش دمای بالا

بار اعمالی	۱۵۰۰ gr
مسافت سایش	۵۰۰ m
سرعت خطی نمونه	۰/۱ m/s
سرعت موتور	۶۰ rpm
دمای آزمون	۲۵-۱۰۰-۲۰۰-۳۰۰ °C

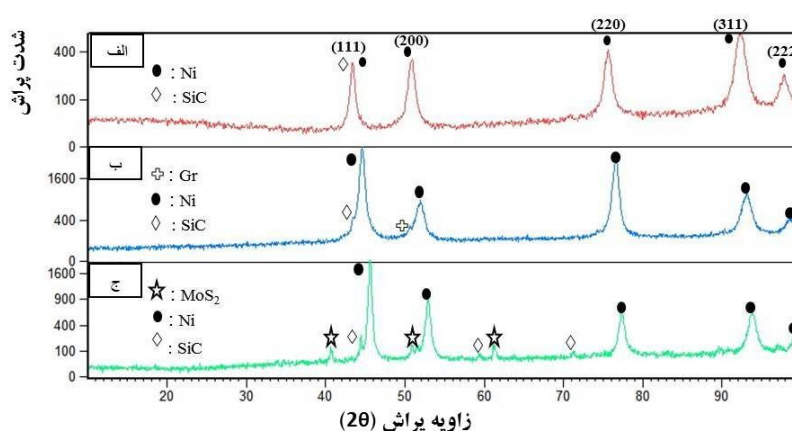
مشخصه‌یابی پوشش‌ها

ریخت (مورفولوژی) سطح پوشش‌ها و همچنین یکنواختی پراکندگی ذرات در آن‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM: Philips XL 30) بررسی شد و به کمک تحلیل EDS از حضور ذرات تقویت‌کننده در پوشش اطمینان به دست آمد. ریزسختی سطح مقطع پوشش‌ها با استفاده از دستگاه ریزسختی سنج مدل Wilson، تحت بار ۱۰۰ گرم اندازه‌گیری شد. برای دقت بیشتر، سختی در پنج نقطه از پوشش اندازه‌گیری و سختی میانگین برآورد شد. افزون بر این، ضخامت هر پوشش با استفاده از تصاویر میکروسکوپی نوری در پنج نقطه از سطح مقطع پوشش تعیین و مقدار میانگین برآورد شد. آنالیز پراش پرتو ایکس بر روی نمونه‌ها با استفاده

از دیفرکتومتر مدل Bruker D8 ADVANCE و با تابش پرتو Cu K در دامنه ° ۱۰-۱۰۰ = ۲ انجام گرفت. با توجه به این که نمونه‌ها به صورت گرد تهیه شده بود، آزمون سایش به روش پین روی دیسک و به کمک دستگاه سایش دمای بالا مجهز به کوره انجام شد. هر نمونه در چهار دمای ۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد (با سه بار تکرار در هر دما)، در شرایطی برابر جدول ۳ تحت سایش قرار گرفته، نمودارهای ضریب اصطکاک-مسافت در هر دما با استفاده از نرم‌افزار دستگاه رسم شد. مقادیر ضریب اصطکاک پس از هر بار سایش، میانگین‌گیری و برای مقایسه رفتار سه پوشش در دماهای گوناگون، بر روی یک منحنی رسم شد. پراکندگی نتایج به صورت انحراف معیار میانگین در روی منحنی سایش نشان

جدول ۴- ضخامت و ریزسختی پوشش‌های Ni-SiC، Ni-SiC-Gr و Ni-SiC-MoS₂

ردیف	پوشش	پارامتر اندازه‌گیری شده	مرتب‌بندی اندازه‌گیری				
			۱	۲	۳	۴	۵
۱	Ni-SiC	ضخامت (μm)	۴۲/۸	۴۳	۴۵/۴	۴۳/۵	۴۴
		ریزسختی (HV _{0.1})	۴۷۸	۴۶۶	۴۶۰	۴۶۴	۴۷۲
۲	Ni-SiC-Gr	ضخامت (μm)	۴۷	۴۲	۴۳	۴۲	۴۴/۴
		ریزسختی (HV _{0.1})	۴۶۰	۴۷۸	۴۶۳	۴۷۰	۴۶۵
۳	Ni-SiC-MoS ₂	ضخامت (μm)	۲۵/۵	۴۱	۳۴/۹	۳۱/۵	۲۸/۲
		ریزسختی (HV _{0.1})	۴۲۰	۳۵۷	۳۲۰	۴۴۵	۳۹۷



شکل ۱- خطوط پراش پرتو ایکس پوشش‌های: الف) Ni-SiC، ب) Ni-SiC-Gr و ج) Ni-SiC-MoS₂

قیاس با پوشش‌های نیکل خالص با تاثیر هم‌زمان سه عامل بافت، اندازه دانه و پراکندگی ذرات کامپوزیتی قابل توضیح است [۴ و ۱۹-۲۲].

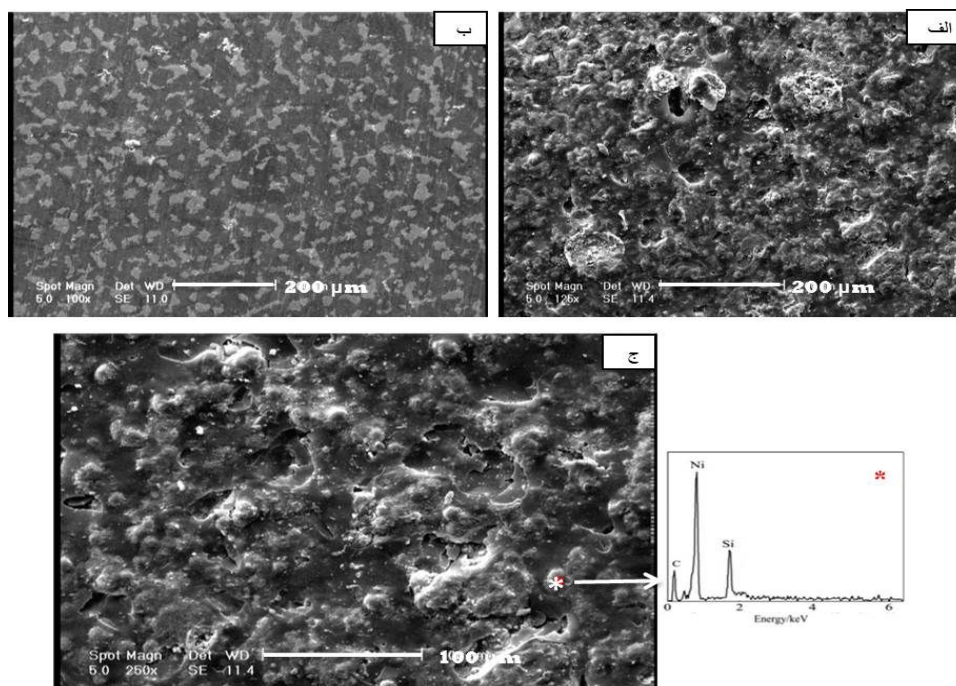
پژوهشگران نشان داده‌اند افزودن ذرات تقویت‌کننده به پوشش نیکل خالص، با دگرگون‌سازی و اصلاح بافت زمینه نیکل موجب افزایش قابل توجه سختی می‌شود [۴ و ۱۹]. همان‌گونه که شکل ۱ نشان می‌دهد خطوط تفرق موجود برای هر سه پوشش، صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر می‌توان گفت هر سه پوشش مخلوطی از جهات بلوری گوناگون را نشان می‌دهند که همین امر سختی و خواص تریبولوژیکی مناسب این پوشش‌ها را به دنبال داشته است. با این وجود انتظار می‌رود با حضور ذرات

داده شده است. در کلیه آزمون‌ها، گلوله آلومینا با کاهش وزن نزدیک به صفر به‌عنوان جسم ساینده مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور تعیین مکانیزم سایش و بررسی تاثیر دما بر ریخت خطوط سایش، بررسی میکروسکوپی این خطوط، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM: Hitachi S4160) صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

ریزسختی و ضخامت پوشش‌ها

مقادیر ریزسختی و ضخامت پوشش‌های گوناگون پس از پنج بار اندازه‌گیری و برآورد مقادیر میانگین در جدول ۴ آورده شده است. افزایش ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی پایه نیکل در

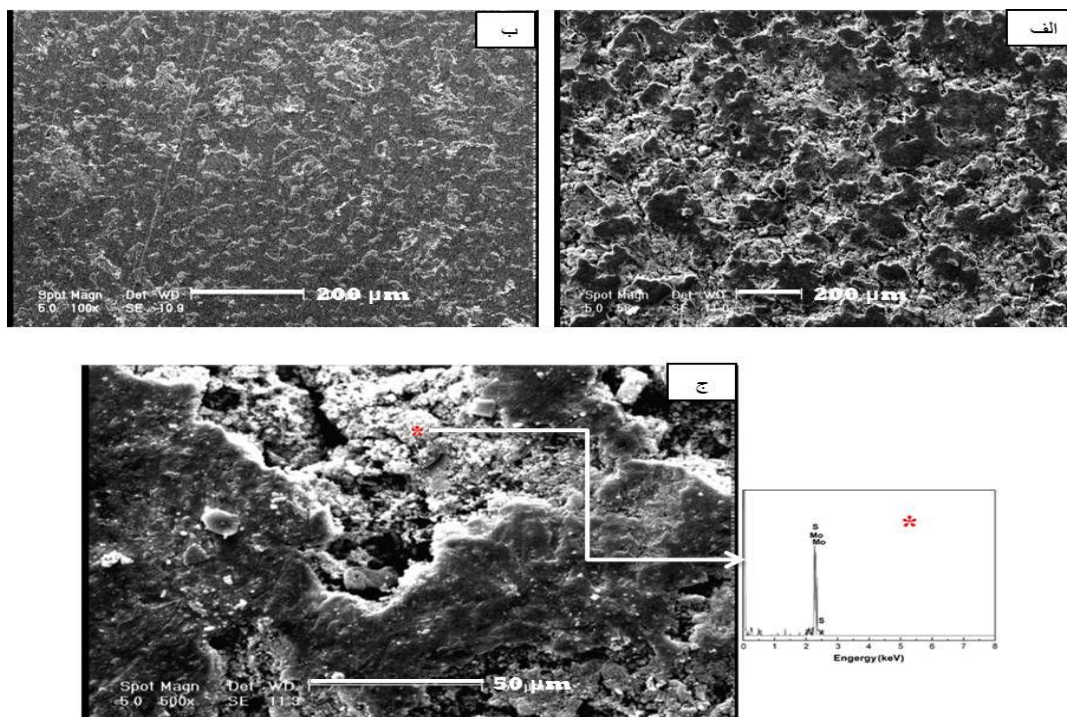


شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی الکترونی از سطح پوشش Ni-SiC:

(الف) ریخت سطح، (ب) پراکندگی ذرات (ج) ریخت سطح و تحلیل EDS برای تعیین حضور ذرات در پوشش

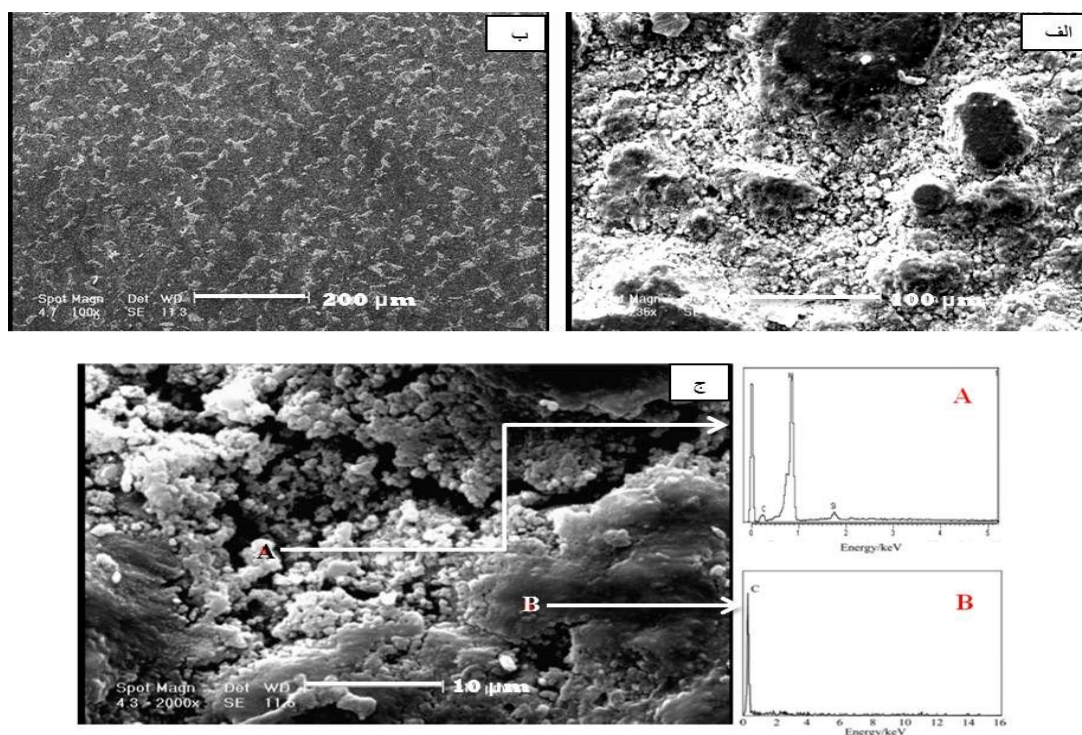
نه تنها از ته نشینی ذرات جلوگیری می‌کند، بلکه به دلیل ایجاد امواج و ارتعاشات شدید، مانع کلوخه شدن آن‌ها می‌شود. به همین دلیل استفاده از هم‌زن فراصوت موجب پراکنده شدن هر چه یکنواخت‌تر ذرات در محلول شده و با جلوگیری از کلوخه شدن، انتقال آن‌ها به سطح زیرلایه را به مراتب تسهیل می‌کند. افزون بر این گزارش‌ها نشان می‌دهد که ذرات منتقل شده به سطح، به عنوان مراکز جوانه‌زنی نیکل عمل کرده و رشد را به تاخیر می‌اندازند. بنابراین پوششی با ابعاد بلورک کوچک‌تر و سطح یکنواخت‌تر به دست خواهد آمد [۲۳]. با توجه به آنچه گفته شد، استفاده هم‌زمان از دو هم‌زن مکانیکی و فراصوت در این پژوهش، موجب به دست آوردن پوشش‌های کامپوزیتی با پراکندگی بسیار یکنواخت از ذرات کاربید سیلیسیم و ذرات روان‌کار جامد و در نتیجه سختی بالای آن‌ها شده است (شکل‌های ۲-۴). در عین حال همان‌گونه که در جدول ۴ نیز مشاهده می‌شود، پوشش کامپوزیتی Ni-SiC-MoS₂ سختی میانگین بسیار کمتری را در قیاس با دو پوشش دیگر نشان می‌دهد. این کاهش به دلیل ساختار اسفنجی، متخلخل و

روان‌کار جامد، سختی پوشش Ni-SiC به گونه محسوسی کاهش یابد [۲]، چرا که بر اساس مکانیزم اوراوان و با توجه به مدول برشی کم گرافیت و MoS₂، این ذرات به سهولت توسط نابجایی‌ها بریده شده و حلقه‌های اوراوان تنها در اطراف ذرات سخت SiC تشکیل می‌شود. در عین حال یافته‌های ریزسختی در این پژوهش چنین کاهش را برای پوشش Ni-SiC-Gr نشان نمی‌دهد. این مساله می‌تواند یک دلیل اساسی داشته باشد و آن هم پراکندگی یکنواخت و مناسب ذرات روان‌کار جامد در کنار ذرات سخت کاربید درون پوشش به دلیل استفاده هم‌زمان از دو هم‌زن مکانیکی و فراصوت است. بر اساس مدل ارایه شده توسط یاه^۱، انتقال ذرات از محلول به زیرلایه، کنترل کننده مقدار رسوب ذرات در فرایند آب‌کاری کامپوزیتی است. بر اساس گزارش‌های ارایه شده، هر چند هم‌زدن مکانیکی به معلق نگه داشتن ذرات درون محلول کمک می‌کند، ولی نمی‌تواند از کلوخه شدن آن‌ها جلوگیری کند. بنابراین با توجه به دشواری انتقال ذرات کلوخه شده نمی‌توان به پراکندگی مناسبی از آن‌ها دست یافت. این در حالی است که استفاده از هم‌زن فراصوت،



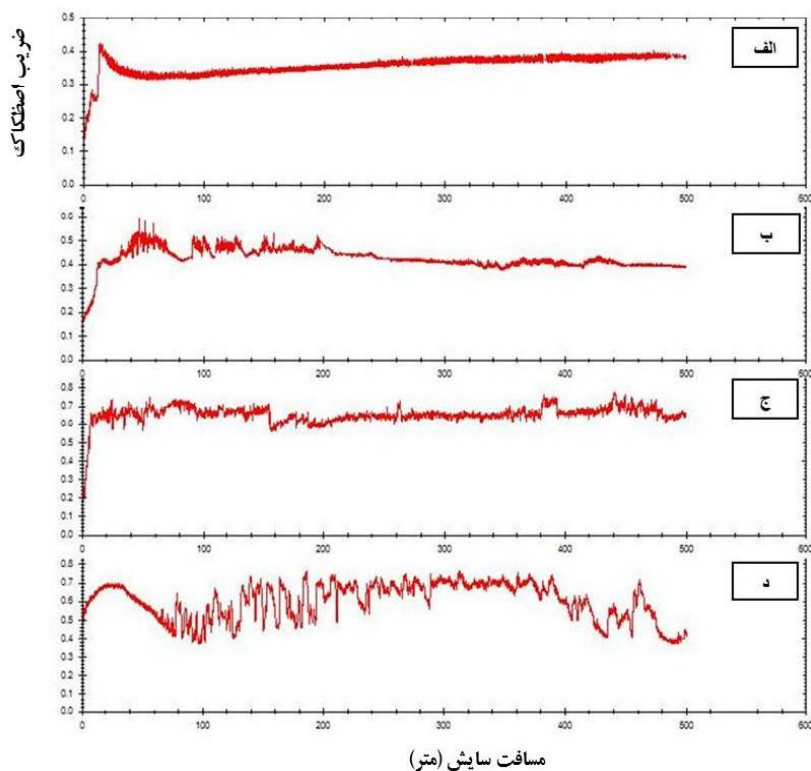
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی الکترونی از سطح پوشش Ni-SiC-MoS_2 :

(الف) ریخت سطح، (ب) پراکندگی ذرات و (ج) ریخت سطح و تحلیل EDS برای تعیین حضور ذرات در پوشش



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی الکترونی از سطح پوشش Ni-SiC-Gr :

(الف) ریخت سطح، (ب) پراکندگی ذرات و (ج) ریخت سطح و تحلیل EDS برای تعیین حضور ذرات در پوشش



شکل ۵- منحنی ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایش پوشش Ni-SiC در دماهای: (الف) ۲۵، (ب) ۱۰۰، (ج) ۲۰۰ و (د) ۳۰۰ درجه سانتی گراد

کاربرد سیلیسیم را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل EDS از سطح این پوشش نیز هم‌رسوبی ذرات کاربید را تایید کرده، نشان می‌دهد این ذرات کاملاً با نیکل پوشیده شده‌اند. افزون بر این، شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهند که حضور ذرات روان‌کار جامد موجب شده است تا ریخت سطح پوشش‌ها دگرگون شده، تراکم آن‌ها در قیاس با پوشش Ni-SiC کاهش یابد. یافته‌های تحلیل EDS نیز حضور ذرات روان‌کار را در کنار ذرات کاربید سیلیسیم درون پوشش تایید می‌کند.

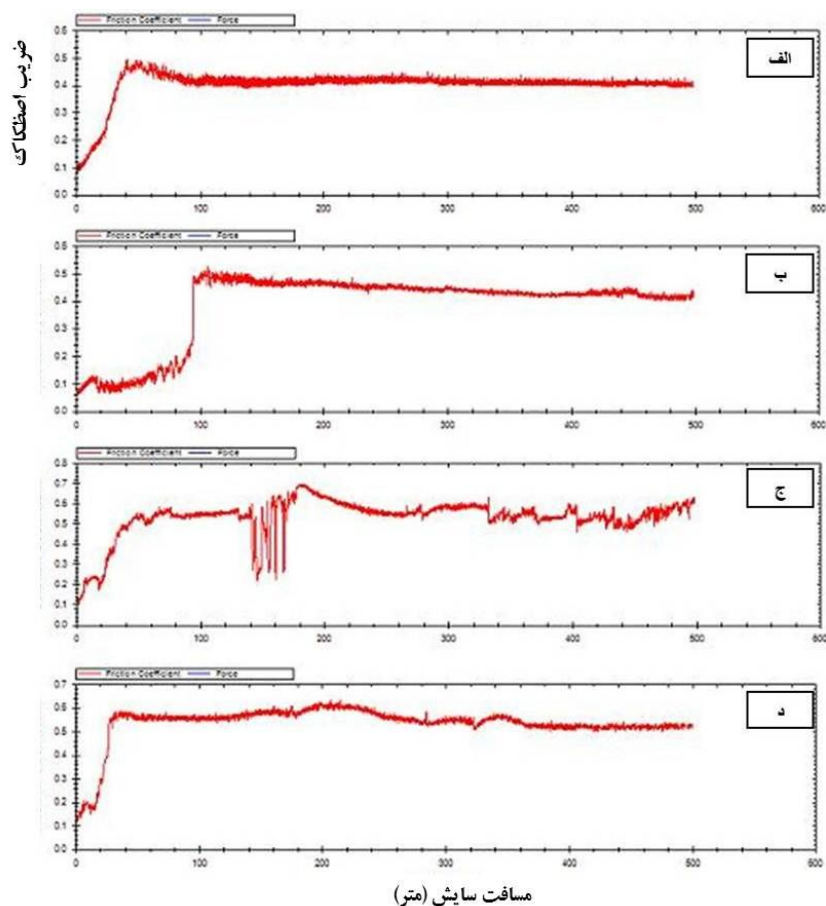
رفتار سایشی

آزمون سایش به روش پین روی دیسک در چهار دمای ۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد روی نمونه‌ها انجام و منحنی ضریب اصطکاک- مسافت برای هر پوشش در این دماها رسم شد (شکل‌های ۵-۷). براساس گزارش دیگر پژوهشگران، ضریب اصطکاک پوشش‌های کامپوزیتی

ناهمگون پوشش دارای ذرات MoS_2 است که دلیل آن، خواص نیمه‌هادی ذرات MoS_2 است. به این ترتیب که رسوب این ذرات سبب خواهد شد یکنواختی پراکندگی جریان الکتریکی در سطح پوشش از بین رفته و نوسانات جریان به وجود آید که سبب می‌شود پوشش یکنواختی به دست نیاید [۱۴]. در نهایت به دلیل همین ساختار متخلخل و ناهمگونی ضخامت، نتایج ریزسختی انحراف و اختلاف زیادی را نشان می‌دهند.

ریزساختار و ریخت

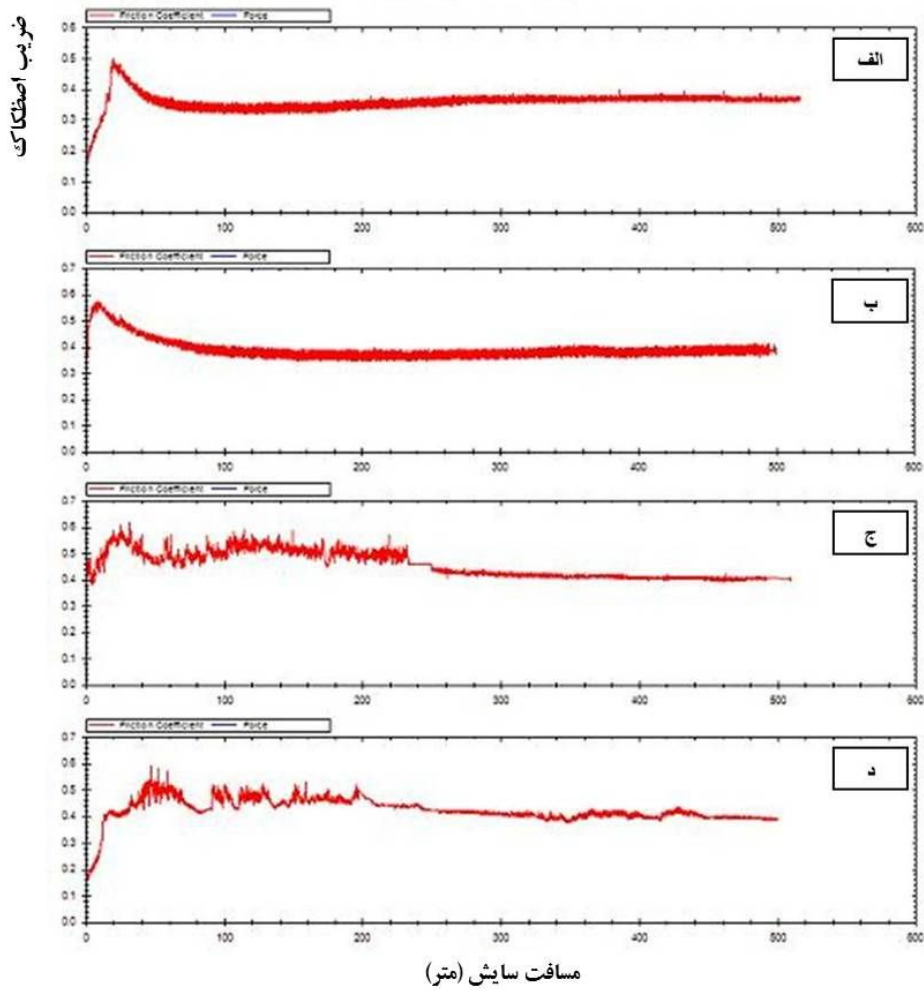
ریخت سطح پوشش‌های کامپوزیتی Ni-SiC، Ni-SiC-Gr و $Ni-SiC-MoS_2$ به ترتیب در شکل‌های ۲-۴ آورده شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که پوشش‌های آب‌کاری نیکل ساختاری گل‌کلمی^۱ دارند [۲۳-۲۵]. ولی همان‌گونه که در شکل ۲ مشخص است، پوشش حاوی ذرات SiC، بسیار متراکم بوده و ریخت سطح آن، به‌خوبی هم‌رسوبی نیکل و ذرات



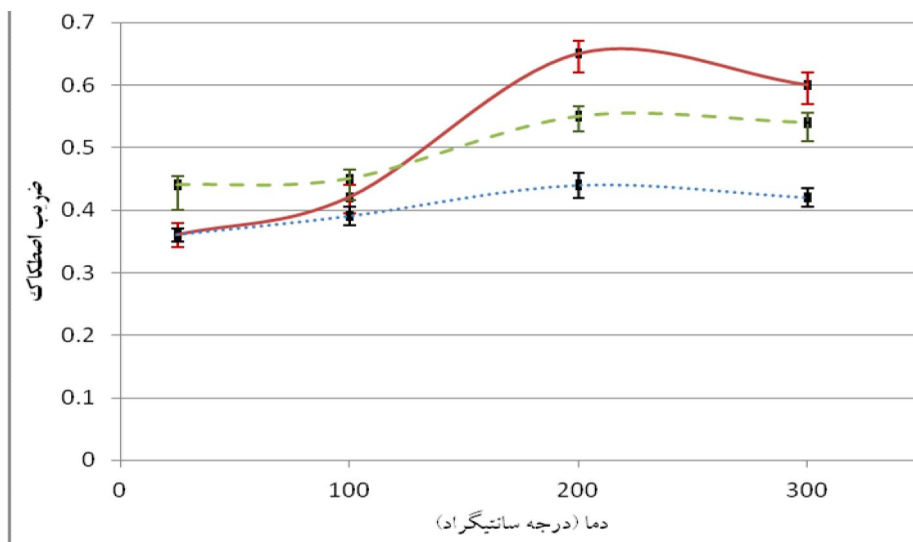
شکل ۶- منحنی ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایش پوشش Ni-SiC-MoS₂ در دماهای: (الف) ۲۵، (ب) ۱۰۰، (ج) ۲۰۰ و (د) ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد

تغییرات میانگین ضریب اصطکاک پوشش Ni-SiC تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد چندان قابل توجه نیست؛ ولی با افزایش دمای سایش به ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، این مقدار به‌صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد. در واقع ضریب اصطکاک این پوشش در دماهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در قیاس با ضریب اصطکاک دمای محیط به‌ترتیب ۱۷، ۸۰ و ۶۷ درصد افزایش نشان می‌دهد. یافته‌های مشابهی نیز در مقادیر کاهش وزن این پوشش پس از آزمون سایش مشاهده می‌شود (شکل ۹). دلیل این کاهش مقاومت سایشی را می‌توان در کاهش استحکام زمینه نیکل و به‌عبارتی افزایش انعطاف‌پذیری آن جستجو کرد. لکا^۲ و همکارانش [۲۴] در پژوهش خود مکانیزم سایش پوشش Ni-SiC را از نوع تری‌واکسیداسیون دانسته، بیان کرده‌اند که ذرات کاربید سیلیسیم و اکسید نیکل

در Ni-SiC در دماها و بارهای معمول، از پایداری خوبی در طول سایش برخوردار است. با این حال آن‌گونه که از نتایج آزمون سایش نیز روشن است، با افزایش دما از میزان این پایداری به‌شدت کاسته می‌شود، به گونه‌ای که در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، نوسان‌های ضریب اصطکاک پوشش Ni-SiC بیشترین مقدار خود را نشان می‌دهند. با این حال افزودن ذرات روان‌کار جامد سبب شده است نوسان‌های مزبور در مورد پوشش‌های دارای این ذرات تا اندازه‌ی بسیار زیادی کاهش یابد. دلیل این امر را می‌توان در پایداری گرمایی گرافیت و MoS₂ در دامنه دمایی آزمون سایش دانست. شکل ۸ مقادیر میانگین ضریب اصطکاک سه پوشش را در دماهای گوناگون سایش نشان می‌دهد. بر اساس این شکل،



شکل ۷- منحنی ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایش پوشش Ni-SiC-Gr در دماهای: الف (۲۵، ب) ۱۰۰، ج) ۲۰۰ و د) ۳۰۰ درجه سانتیگراد



شکل ۸- مقادیر میانگین ضریب اصطکاک پوششها در دماهای گوناگون

جدول ۵- مقادیر میانگین ضریب اصطکاک پوشش‌ها و درصد دگرگونی آن در پوشش‌های دارای ذرات روان‌کار نسبت به پوشش Ni-SiC

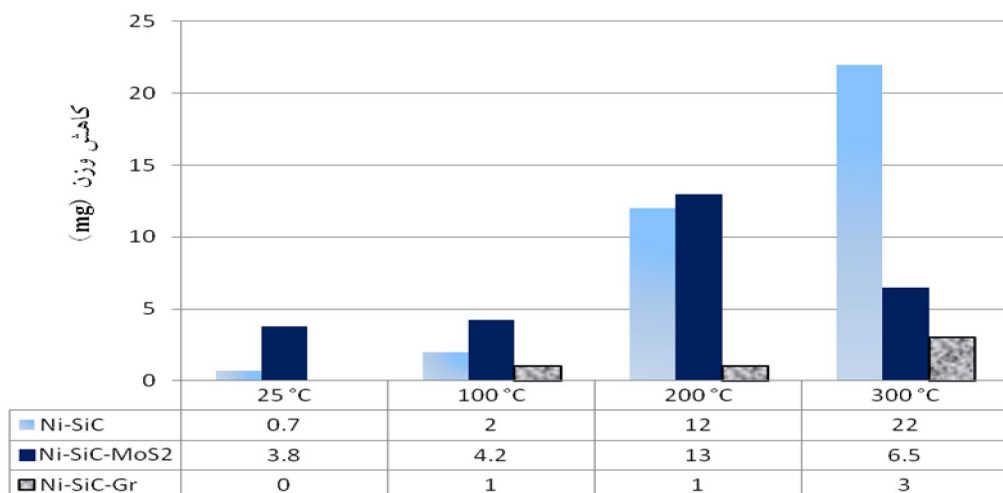
درصد دگرگونی ضریب اصطکاک در مقایسه با پوشش Ni-SiC			میانگین ضریب اصطکاک			دمای آزمون
Ni-SiC-Gr	Ni-SiC-MoS ₂		Ni-SiC-Gr	Ni-SiC-MoS ₂	Ni-SiC	
۰	+۲۲		۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۳۶	۲۵ °C
-۷	+۷		۰/۳۹	۰/۴۵	۰/۴۲	۱۰۰ °C
-۳۲	-۱۵		۰/۴۴	۰/۵۵	۰/۶۵	۲۰۰ °C
-۳۰	-۱۰		۰/۴۲	۰/۵۴	۰/۶۰	۳۰۰ °C

پایین بوده، در دماهای ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد ناگهان افزایش می‌یابد (شکل ۸). درصد این افزایش در دماهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای محیط به ترتیب ۲، ۲۵ و ۲۳ درصد است که در مقایسه با پوشش مزبور در نبود ذرات روان‌کار بسیار کم‌تر است. بررسی ریخت سطوح سایش (شکل ۱۱) نیز یافته‌های مشابهی را نشان می‌دهد. در مجموع و با توجه به تصاویر سطوح سایش در دماهای گوناگون می‌توان گفت که حضور ذرات روان‌کار جامد MoS₂ گرچه توانسته تا اندازه‌ای از اصطکاک‌های موضعی شدید و جدا شدن ذرات کاربرد و لایه‌های اکسید از سطح پوشش جلوگیری کند، اما در دماهای بالا هم‌چنان اثرات سایش چسبان و کندگی نمایان است. شاید مهمترین دلیل این عملکرد را به‌توان در غیریکنواختی ضخامت این پوشش و هم‌چنین ناتوانی ذرات MoS₂ در محیط‌های غیرخلا دانست. در واقع انجام آزمون سایش در اتمسفرهای کنترل نشده، به‌شدت عملکرد MoS₂ را تحت تاثیر قرار داده، مانع ایفای مناسب نقش روان‌کاری برای این ماده می‌شود.

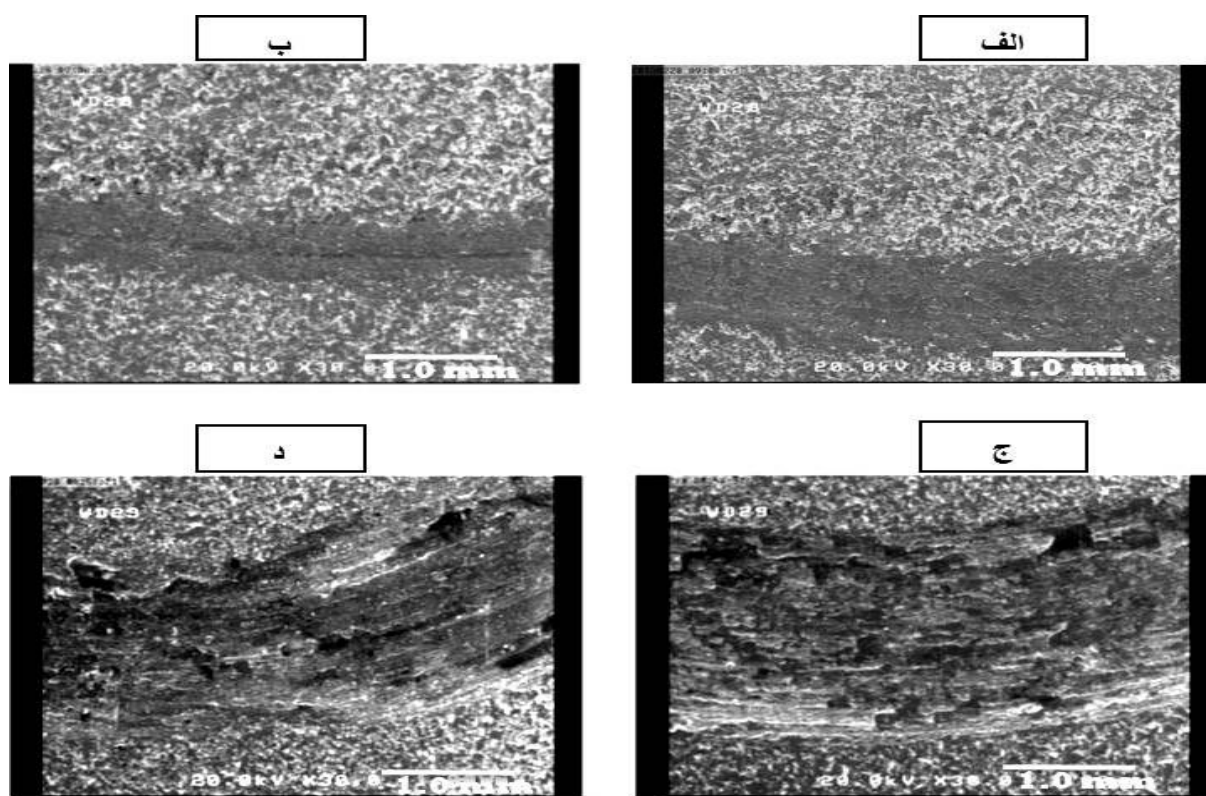
بهترین رفتار سایشی در بین سه پوشش مورد بررسی، از پوشش دارای ذرات گرافیت مشاهده شد. پوشش کامپوزیتی Ni-SiC-Gr گذشته از این‌که به‌دلیل پایداری گرمایی مناسب ذرات گرافیت و حفظ خاصیت روان‌کاری در بازه دمایی آزمون سایش، توانست نوسان‌های ضریب اصطکاک را در قیاس با پوشش Ni-SiC کمینه کند (شکل ۷)، مانع افزایش ضریب اصطکاک و کاهش مقاومت سایشی نیز شد. همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، مقادیر ضریب اصطکاک افزایش چندانی

جدا شده از سطح، در این نوع سایش به‌عنوان جسم سوم عمل می‌کنند. روشن است که با افزایش دما، زمینه نیکل دیگر توانایی نگهداری ذرات SiC را درون خود نداشته، در نتیجه این ذرات از سطح پوشش جدا می‌شوند. افزون بر این، به‌نظر می‌رسد با افزایش اکسیداسیون نیکل در دماهای بالا، ذرات اکسید نیز از سطح جدا شده، وارد مکانیزم سایش می‌شوند. هرچند در تمامی دماها مخلوطی از سایش خراشان و سایش چسبان مشاهده می‌شود (شکل ۱۰)، در دماهای بالا سایش چسبان مکانیزم چیره است به‌نحوی که با افزایش دما، میزان کندگی‌ها در پوشش بیشتر شده و در دماهای ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین میزان کندگی دیده می‌شود. در مجموع می‌توان گفت ذرات سخت کاربرد سیلیسیم به‌همراه لایه‌های اکسید نیکل جدا شده از سطح، به‌عنوان جسم سوم مهمترین نقش را در سایش دمای بالای پوشش مزبور داشته و منجر به تشدید سایش چسبان می‌شوند.

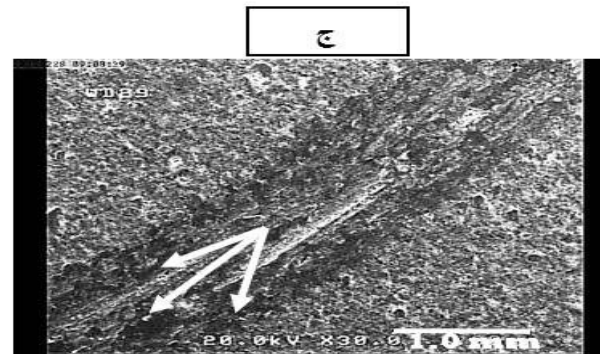
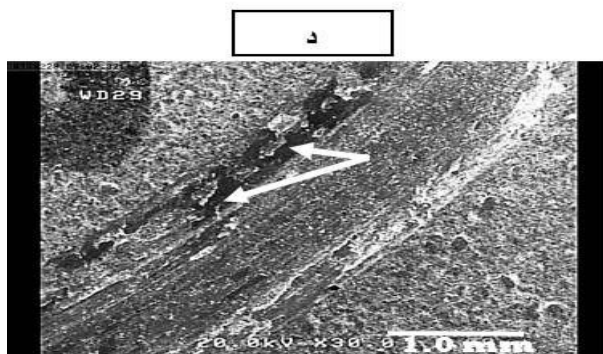
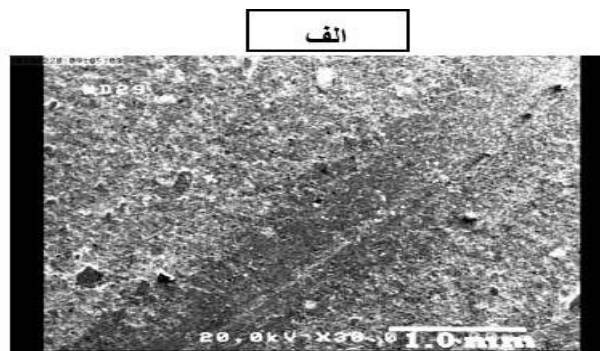
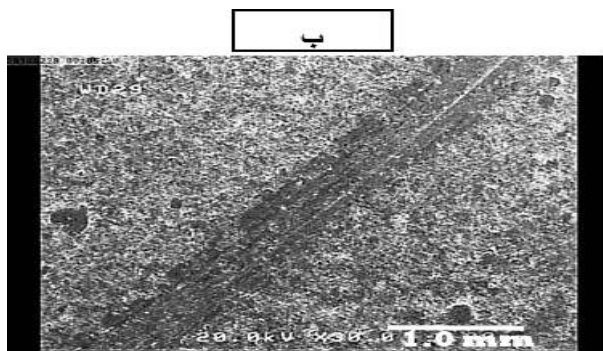
به‌منظور بهبود این رفتار، ذرات روان‌کار جامد گرافیت و MoS₂ به‌طور مجزا به پوشش Ni-SiC افزوده و رفتار سایشی پوشش‌های جدید در دماهای گوناگون ارزیابی شد. همان‌گونه که شکل ۶ نشان می‌دهد پایداری ضریب اصطکاک در پوشش Ni-SiC-MoS₂، در دماهای بالا افزایش یافته است. این مساله ناشی از ماهیت ذرات روان‌کار است که با داشتن پایداری گرمایی در دمای آزمون، از ایجاد نوسان در ضریب اصطکاک هنگام سایش جلوگیری می‌کند. با این وجود، چگونگی دگرگونی ضریب اصطکاک، مشابه پوشش بدون ذرات روان‌کار است؛ به این صورت که این مقدار در دماهای ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد



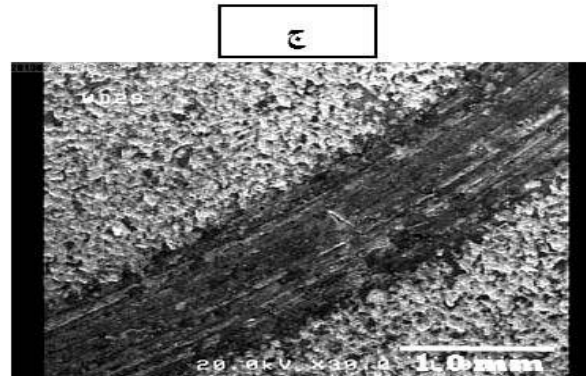
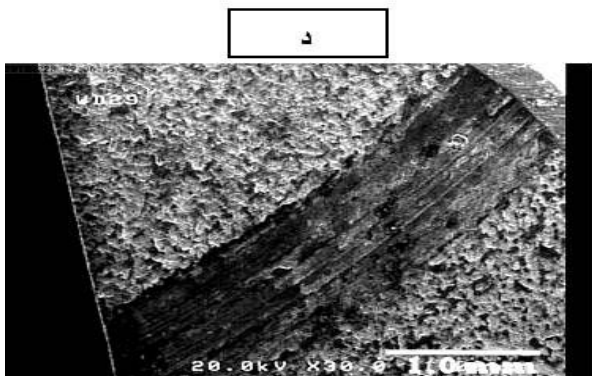
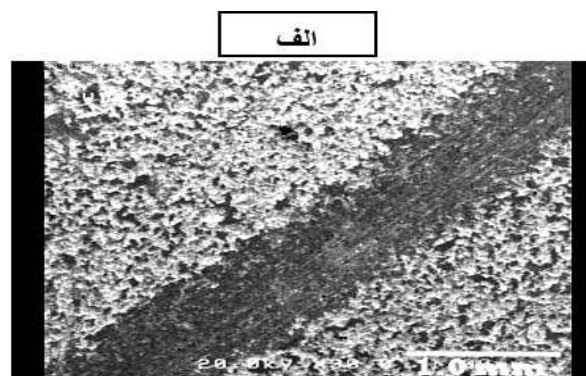
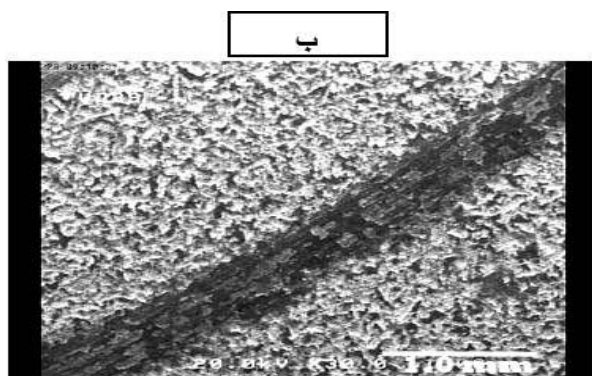
شکل ۹- مقادیر کاهش وزن پوشش‌ها پس از انجام آزمون سایش در دماهای گوناگون



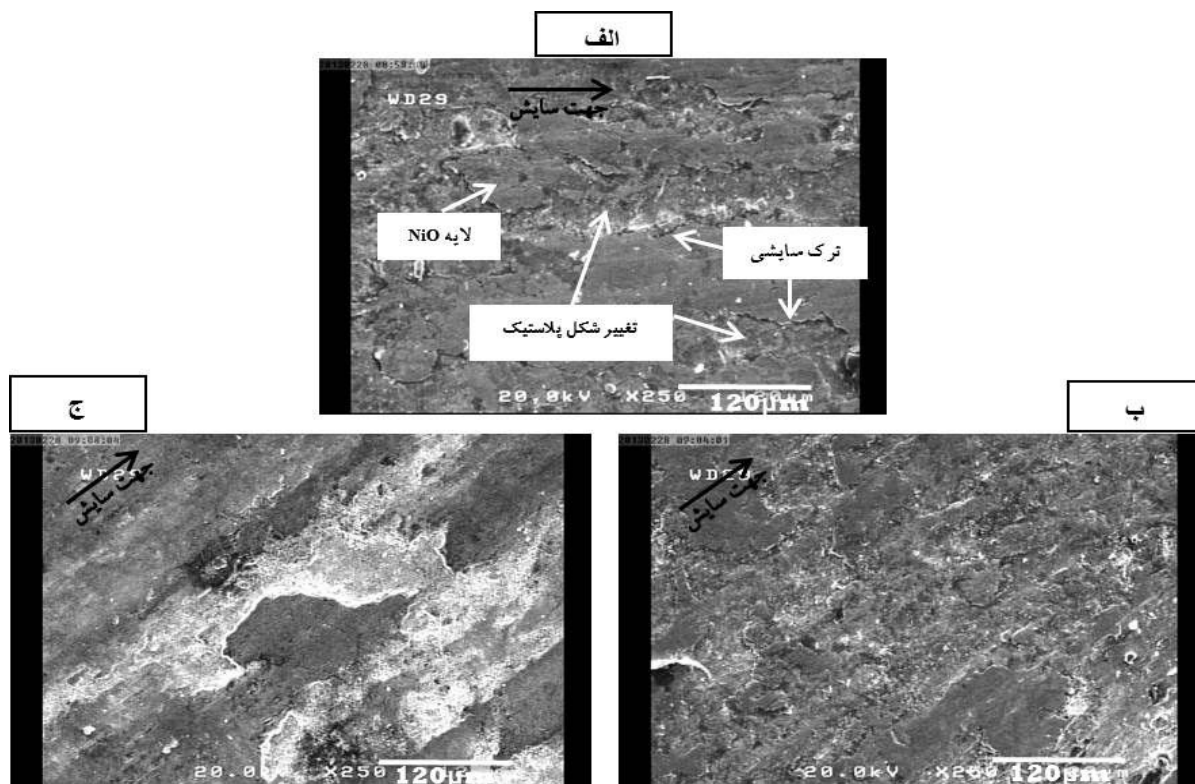
شکل ۱۰. ریخت سطوح سایش پوشش Ni-SiC در دماهای: الف) ۲۵، ب) ۱۰۰، ج) ۲۰۰ و د) ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۱. ریخت سطوح سایش پوشش Ni-SiC-MoS₂ در دماهای: الف) ۲۵، ب) ۱۰۰، ج) ۲۰۰ و د) ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۲. ریخت سطوح سایش پوشش Ni-SiC-Gr در دماهای: الف) ۲۵، ب) ۱۰۰، ج) ۲۰۰ و د) ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۳. ریخت سطوح سایش سه پوشش: الف) Ni-SiC، ب) Ni-SiC-MoS₂ و ج) Ni-SiC-Gr در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد

۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، همان‌گونه که گفته شد ضریب اصطکاک پوشش Ni-SiC به شدت افزایش می‌یابد. افزودن ذرات روان‌کار موجب شده تا این مقدار به‌گونه‌ی قابل توجهی کاهش یابد. با این وجود در این دماها نیز ضریب اصطکاک پوشش دارای ذرات گرافیت کم‌تر از پوشش Ni-SiC-MoS₂ است. یافته‌های به‌دست آمده از کاهش وزن (شکل ۹) نیز این مطلب را تایید می‌کند، به‌گونه‌ای که در هر چهار دما پوشش دارای ذرات گرافیت کمترین کاهش وزن را داشته است.

تصاویر بزرگ‌نمایی بالاتر از سطوح سایش سه پوشش در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، تغییر شکل پلاستیک شدید را در پوشش Ni-SiC تایید می‌کند که بیانگر افت استحکام زمینه در دماهای بالا است. وجود ترک‌هایی در جهت سایش نیز گواه این مدعاست (شکل ۱۳-الف). در مورد پوشش دارای ذرات MoS₂ (شکل ۱۳-ب) نیز با وجود کاهش شدت سایش، هم‌چنان کندگی و تغییر شکل پلاستیک در سطح پوشش

را با افزایش دما نشان نمی‌دهند. بررسی ریخت سطوح سایش نشان می‌دهد که حضور ذرات گرافیت درون پوشش موجب شده تا کندگی‌هایی که در دو پوشش قبلی در دماهای بالا مشاهده می‌شد، در این پوشش بسیار کمتر باشد (شکل ۱۲) و نقش چیره سایش خراشان در دماهای پایین (۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)، در دماهای بالاتر نیز حفظ شود. یافته‌های به‌دست آمده از ضریب اصطکاک (شکل ۸) و کاهش وزن (شکل ۹) نیز خود بیانگر این مطلب است.

جدول ۵ میانگین ضریب اصطکاک پوشش‌های دارای ذرات روان‌کار جامد و درصد دگرگونی آن در دماهای گوناگون را نسبت به پوشش Ni-SiC نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، هر سه پوشش در دماهای ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، ضریب اصطکاک‌های نسبتاً خوب و نزدیک به هم را نشان می‌دهند. با این حال در این بین پوشش دارای ذرات گرافیت کمترین ضریب اصطکاک را داراست. با افزایش دما به ۲۰۰ و

مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد این ذرات روان‌کار توانایی کافی برای جلوگیری از سایش شدید پوشش Ni-SiC در شرایط آزمایش را ندارند. با این حال، همان‌گونه که در شکل ۱۳-ج نیز مشخص است، حضور ذرات گرافیت در پوشش به‌خوبی توانسته از بروز تغییر شکل پلاستیک شدید در زمینه نیکل جلوگیری کند. در واقع ذرات گرافیت در هنگام فرایند سایش از سطح جدا شده و یک لایه‌ی گرافیتی بین سطح پوشش و جسم ساینده تشکیل می‌دهند. در چنین شرایطی با وجود افت استحکام زمینه در دماهای بالا، در هنگام اعمال تنش، گرافیت به‌عنوان یک لایه روان‌کار عمل کرده و اجازه به‌وجود آمدن کندگی‌های شدید را در پوشش نمی‌دهد و همان‌گونه که پیش‌تر نیز گفته شد، پوشش Ni-SiC-Gr در این دما هم‌چنان مقاومت سایشی بالایی را از خود نشان می‌دهد. در واقع بزرگترین تفاوت پوشش‌های دارای ذرات گرافیت و MoS_2 را باید در اتمسفر کاری مناسب این دو روان‌کار جستجو کرد. MoS_2 برای ایفای مناسب نقش روان‌کاری باید در محیط خلا مورد استفاده قرار گیرد، در حالی که گرافیت عملکرد بهتری را در اتمسفر محیط از خود نشان می‌دهد [۱۳].

در پایان می‌توان گفت در بسیاری از کاربردها، پوشش‌های Ni-SiC به‌تنهایی نمی‌توانند از بروز سایش در دماهای بالا جلوگیری کنند. به‌علاوه، روان‌کارهای مایع نیز ممکن است نتوانند عملکرد مناسبی را دماهای بالا داشته باشند. به‌همین جهت استفاده از روان‌کارهای جامد در پوشش‌های Ni-SiC لازم به‌نظر می‌رسد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که افزودن ذرات گرافیت به‌زمینه این پوشش‌ها می‌تواند با کاهش چشم‌گیر تلفات سایشی، عمر قطعات پوشش‌دهی شده را، به‌ویژه زمانی که تحت سایش در دماهای بالا قرار دارند، به‌گونه قابل توجهی افزایش دهد.

نتیجه‌گیری

- استفاده از هم‌زن فراصوت در کنار هم‌زن مکانیکی، نقش مهمی در پراکندگی مناسب ذرات و جلوگیری از کلوخه‌شدن آن‌ها در هنگام پوشش‌دهی دارد. به‌عبارت دیگر، ایجاد پراکندگی مناسبی از ذرات سخت و روان‌کار جامد درون پوشش، موجب شده کاهش آشکاری در مقادیر ریزسختی مشاهده نشود.
- پوشش کامپوزیتی Ni-SiC در دماهای نزدیک به دمای محیط، مقاومت سایشی خوبی از خود نشان می‌دهد. ولی با افزایش دما و به‌ویژه در دماهای ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد که نزدیک به بازه دمای کاری بسیاری از قطعات دارای این پوشش، نظیر برخی قالب‌های ریخته‌گری و یا سیلندرهای موتور، است این ویژگی به‌شدت افت می‌کند.
- افزودن ذرات روان‌کار جامد MoS_2 با پایداری گرمایی مناسب، موجب شده است پوشش دارای این ذرات بتواند در برابر افت شدید مقاومت سایشی در دماهای بالا، قدری مقاومت نشان دهد. با این حال، افزایش مقادیر ضریب اصطکاک و کاهش وزن، با افزایش دمای سایش هم‌چنان باقی بوده و اثرات کندگی‌های موضعی در دماهای بالا بر روی سطح پوشش آشکار است.
- پوشش دارای ذرات گرافیت در تمامی دماها، بهترین رفتار تریبولوژیکی را نشان می‌دهد. مقادیر کاهش وزن و ضریب اصطکاک پوشش Ni-SiC-Gr با افزایش دمای سایش دگرگونی چندانی نداشته، اثری نیز از کندگی‌های عمیق در سطح پوشش دیده نمی‌شود، به‌عبارتی مشابه دماهای پایین، مکانیزم چیره، سایش خراشان است.

1. Yeh's model

2. Cauliflower structure

3. Lekka

- Eijsbouts, S., Van Den Oetelaar, L.C.A. and Van Puijenbroek, R.R., "MoS₂ Morphology and Promoter Segregation in Commercial Type 2 Ni-Mo/Al₂O₃ and Co-Mo/Al₂O₃ Hydroprocessing Catalysts", *Journal of Catalysis*, Vol. 229, pp. 352-364, 2005.
- Wu, Y., Liu, L., Shen, B. and Hu, W., "Study of Self-lubricant Ni-P-PTFE-SiC Composite Coating", *Journal of Materials Science*, Vol. 40, pp. 5057-5059, 2005.
- Heidari, G., Tavakoli, H. and Mousavi Khoie, S.M., "Nano SiC-Nickel Composite Coatings from a Sulfamat Bath Using Direct Current and Pulsed Direct Current", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, pp. 1183-1188, 2010.
- Vaezi, M.R., Sadrnezhad, S.K. and Nikzad, L., "Electrodeposition of Ni-SiC Nano-Composite Coatings and Evaluation of Wear and Corrosion Resistance and Electroplating Characteristics", *Colloids and Surfaces A: Physicochem and Engineering Aspects*, Vol. 315, pp. 176-182, 2008.
- Wang, P., Cheng, Y. and Zhang, Z., "A Study on the Electrodeposition Processes and Properties of Ni-SiC Nanocomposite Coatings", *Journal of Coatings Technology and Research*, Vol. 8, pp. 409-417, 2011.
- Bratu, F., Benea, L. and Celis, J., "Tribocorrosion Behaviour of Ni-SiC Composite Coatings Under Lubricated Conditions", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 6940-6946, 2007.
- Lipp, L.C., "Solid Lubricants- Their Advantages and Limitations", *Lubrication Engineering*, Vol. 32, pp. 574-584, 1975.
- Brudnyi, A.I. and Karmadonov, A.F., "Structure of Molybdenum Disulphide Lubricant Film", *Wear*, Vol. 33, pp. 243-249, 1975.
- García-Lecina, E., García-Urrutia, I., Díez, J.A., Fornell, J. Pellicer, E. and Sort, J., "Codeposition of Inorganic Fullerene-Like WS₂ Nanoparticles in an Electrodeposited Nickel Matrix Under the Influence of Ultrasonic Agitation", *Electrochimica Acta*, Vol. 114, pp. 859-867, 2013.
- Shankara, A., Menezes, P.L., Simha, K.R.Y. and Kailas, S.V., "Study of Solid Lubrication with MoS₂ Coating in the Presence of Additives Using Reciprocating Ball-on-Flat Scratch Tester", *Sadhana*, Vol. 33, pp. 207-220, 2008.
- Guo, M.L.T. and Tsao, C.Y.A., "Tribological Behavior of Aluminum/SiC/Nickel-Coated Graphite Hybrid Composites", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 333, pp. 134-145, 2002.
- Bahaaideen, F.B., Ripin, Z.M. and Ahmad, Z.A., "Electroless Ni-P-Cg(Graphite)-SiC Composite Coating and its Application onto Piston Rings of a Small Two Stroke Utility Engine", *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 69, pp. 830-834, 2010.
- هویتچینگز، ای. ام، ترجمه بخشی، س.ر، "تریبولوژی، اصطکاک و سایش مواد مهندسی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۳.
- Cardinal, M.F., Castro, P.A., Baxi, J., Liang, H. and Williams, F.J., "Characterization and Frictional Behavior of Nanostructured Ni-W-MoS₂ Composite Coatings", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 204, pp. 85-90, 2009.
- Huang, Z. and Xiong, D., "MoS₂ Coated with Al₂O₃ for Ni-MoS₂/Al₂O₃ Composite Coatings by Pulse Electrodeposition", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, pp. 3208-3214, 2008.
- MA, K., Guo, Z., Zhu, X. and Xu, R., "Characteristics of Electrodeposited RE-Ni-W-B-B₄C-MoS₂ Composite Coating", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 13, pp. 1220-1225, 2003.
- Wu, B., Yu, X., Zhang, B. and Xu, B., "Preparation and Characterization of Graphite-Nickel Composite Coatings by Automatic Brush Plating", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, pp. 1975-1979, 2008.
- Cai, B., Tan, Y., Tu, Y., Wang, X. and Xu, T., "Effects of Graphite Content on Microstructure and Tribological Properties of Graphite/TiC/Ni-base Alloy Composite Coatings", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, pp. 1741-1749, 2011.
- Pavlatou, E.A., Stroumbouli, M. and Gyftou, P., "Hardening Effect Induced by Incorporation of SiC Particles in Nickel Electrodeposits", *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 36, pp. 385-394, 2006.
- Zimmerman, A.F., Clark, D.G., Aust, K.T. and Erb, U., "Pulse Electrodeposition of Ni-SiC Nanocomposite", *Materials Letters*, Vol. 52, pp. 85-90, 2002.
- Wang, S. and Wei, W.J., "Characterization of Electroplated Ni/SiC and Ni/Al₂O₃ Composite Coatings Bearing Nanoparticles", *Journal of Materials Research*, Vol. 18, pp. 1566-1574, 2003.
- Dieter, G.E., *Mechanical Metallurgy*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1986.
- Cai, C., Zhu, X.B., Zheng, G.Q., Yuan, Y.N., Huang, X.Q., Cao, F.H., Yang, J.F. and Zhang, Z., "Electrodeposition and Characterization of Nano-Structured Ni-SiC Composite Films", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, pp. 3448-3454, 2011.
- Lekka, M., Lanzutti, A., Casagrande, A., De Leitenburg, C., Bonora, P.L. and Fedrizzi, L., "Room and High Temperature Wear Behaviour of

Ni Matrix Micro- and Nano-SiC Composite Electrodeposits", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 206, pp. 3658–3665, 2012.

25. Lekka, M., Kouloumbi, N., Gajo, M. and Bonora,

P.L., "Corrosion and Wear Resistant Electrodeposited Composite Coatings", *Electrochimica Acta*, Vol. 50, pp. 4551–4556, 2005.