

مقایسه رفتار تریبولوژیکی فولاد ابزار کربنی دارای پوشش‌هایی از ترکیبات بین فلزی Fe-Al و Fe-Al-Ni

مهدی صالحی
دانشیار

مرتضی شمعیان اصفهانی
دانشجوی دوره دکتری

فخرالدین اشرفی زاده
استادیار

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

استفاده از ترکیبات بین فلزی Fe-Al و Fe-Al-Ni جهت بهبود رفتار تریبولوژیکی فولاد ابزار کربنی مورد پژوهش قرار گرفته است. به منظور تشکیل ترکیبات بین فلزی Fe-Al از روش پودر فشرده همراه با آنیل نفوذی استفاده شد. به منظور تشکیل ترکیبات بین فلزی Fe-Al-Ni ابتدا بر روی تعدادی از نمونه‌های فولادی پوشش نیکلی با ضخامت‌های ۲۰ و ۴۰ μm ایجاد و سپس فرآیند آلومینایزینگ به روش پودر فشرده در دما و زمان‌های مختلف انجام و شرایط بهینه پوشش دادن براساس رفتار تریبولوژیکی تعیین گردید. نتایج بررسی‌های تریبولوژیکی نمونه‌های بدون پوشش و نمونه‌های پوشش داده شده، بیانگر افزایش مقاومت سایشی و کاهش ضریب اصطکاک نمونه‌های پوشش داده شده می‌باشد و این بهبود به دلیل افزایش سختی سطح، شیب سختی ملایم از سطح به سمت زمینه و ترد نبودن لایه‌های سطحی است. همچنین رفتار تریبولوژیکی فولاد با پوشش Fe-Al-Ni در مقایسه با پوشش Fe-Al بسیار مناسب‌تر می‌باشد. مکانیزم غالب سایش فولاد بدون پوشش ورقه‌ای شدن همراه با خیش خوردن و نمونه‌هایی که دارای پوشش بهینه‌ای از ترکیبات بین فلزی می‌باشند، از نوع ورقه‌ای شدن همراه با سایش اکسیداسیونی می‌باشد.

Comparison Between Tribological Behaviour of Fe-Al and Fe-Al-Ni Intermetallic Coated Carbon Tool Steel

M. Shamanian
Ph.D. Student

M. Salehi
Associate Prof.

F. Ashrafizadeh
Assistant Prof.

Department of Materials, Isfahan Univ. of Tech.

Abstract

The use of Fe-Al and Fe-Al-Ni intermetallic coatings in order to improve tribological behaviour of carbon tool steel has been investigated. In order to form intermetallic compounds of Fe-Al, the pack cementation process and then diffusion annealing were used. For the formation of Fe-Al-Ni intermetallic compounds, nickel coatings of 20 and 40 μm were deposited on the bare steel specimens and then aluminizing process was carried out by pack cementation method at different temperature and time. The optimum coating procedure was selected on the basis tribological behaviour.

The results of the wear experiments indicate that these coatings improve the wear resistance of carbon tool steel significantly. The tribological behaviour are extremely improved in case of pre-nickel coated surface prior to aluminizing process. The predominant wear mechanism of steel specimen was identified as delamination wear with ploughing whereas the optimum coatings specimen worn by delamination wear with oxidative wear processes.

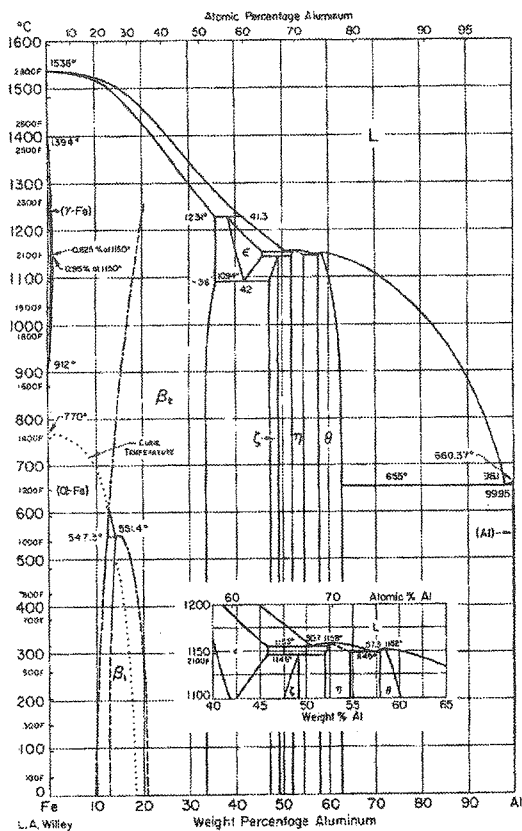
۱- مقدمه

توسعه پوشش‌های ترکیبات بین فلزی در سال‌های اخیر برای بهبود خواص تریبولوژیکی لایه سطحی مورد توجه قرار گرفته است [۱-۴]. پوشش‌های مزبور از دسته پوشش‌های نفوذی فلزی می‌باشند، که بر خلاف اکثر پوشش‌های حاصل از فرآیندهای دیگر که در نوع خود مواجه با فصل مشترک‌های تند در خواص فیزیکی و مکانیکی، چون ضریب انبساط حرارتی، هدایت حرارتی و سختی با زیر لایه بوده و به تبع آن دارای استحکام چسبندگی ضعیفی با زمینه هستند، خوشبختانه مواجه با این محدودیت‌ها نبوده و در واقع غیر پیوستگی ناگهانی مزبور را، به وسیله یک فصل مشترک با شیب ملایم بین پوشش و زمینه به حداقل رسانده‌اند.

ترکیبات بین فلزی Fe-Al به منظور بهبود خواص سطحی فولادها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵-۶] و دیاگرام فازی سیستم آهن-آلومینیم در شکل ۱ احتمال تشکیل فازها را نشان می‌دهد [۷].

ترکیبات بین فلزی Al-Ni به منظور بهبود خواص سطحی قطعات نیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸-۱۰] و دیاگرام فازی سیستم نیکل-آلومینیم در شکل ۲ احتمال تشکیل فازها را نشان می‌دهد [۱۱].

هدف از این تحقیق تشکیل ترکیبات بین فلزی مناسبی از Fe-Al و Fe-Ni-Al بر سطح فولاد ابزار کربنی به منظور بهبود رفتار تریبولوژیکی آن بوده است.



شکل (۱) دیاگرام فازی سیستم آهن-آلومینیم [۷]

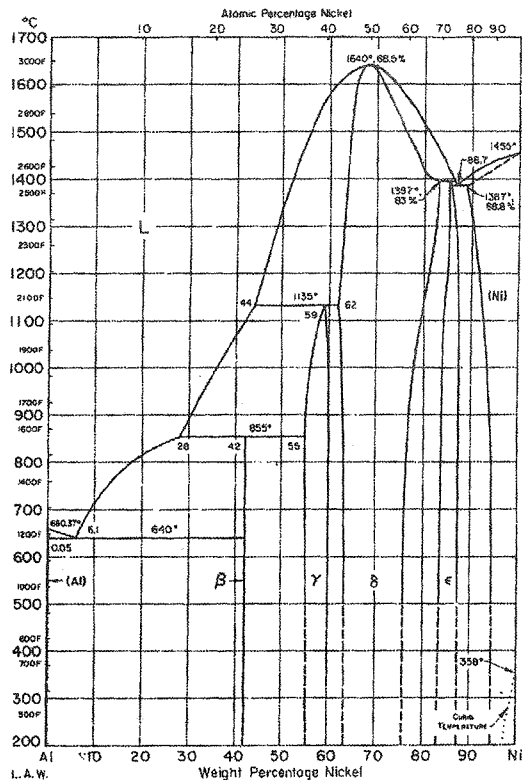
- θ با فرمول Al_3Fe و ساختمان مونوکلینیک پیچیده
- η با فرمول Al_5Fe_2 و ساختمان ارتورمبیک
- ζ با فرمول Al_2Fe و ساختمان رهمیدرال
- β_2 با فرمول AlFe و ساختمان BCC
- β_1 با فرمول AlFe_3 و ساختمان FCC

زمینه در جدول ۱ ارائه شده است. کلیه نمونه ها تا سنباده شماره ۵۰۰ پرداخت شدند و قبل از پوشش دادن توسط محلول اسید کلریدریک ۵ مولار به مدت ۳۰ ثانیه اسیدشویی شدند.

جهت تشکیل ترکیبات بین فلزی Fe-Al از روش پودر فشرده استفاده گردید و فرآیند آلومینایزینگ در دمای ۸۵۰°C و به مدت ۶ ساعت انجام یافت. پس از آن به منظور انجام آنیل نفوذی، نمونه ها در دمای ۹۰۰°C و زمان ۲ تا ۲۵ ساعت در کوره لوله ای مقاومتی با اتمسفر کنترل شده گاز آرگون قرار گرفتند و بهترین زمان آنیل نفوذی انتخاب گردید (جدول ۲).

بررسی تشکیل ترکیبات بین فلزی Fe-Al-Ni ابتدا بر روی تعدادی از نمونه های فولادی به روش الکتروپلیتینگ پوشش نیکلی با ضخامت های ۲۰ و ۴۰ μm ایجاد گردید و سپس نمونه ها تحت عملیات آلومینایزینگ قرار گرفتند. فرآیند آلومینایزینگ در دو دمای ۸۵۰°C و ۱۰۵۰°C به مدت ۶ ساعت در همان مخلوط پودری مربوط به آلومینایزینگ نمونه های فولادی انجام گردید. پس از آن به منظور انجام آنیل نفوذی نمونه هایی که در دمای ۸۵۰°C آلومینایز شده بودند، در دمای ۱۰۵۰°C و زمان ۱ تا ۵ ساعت در کوره لوله ای مقاومتی با اتمسفر گاز آرگون آنیل نفوذی گردیدند و زمان بهینه براساس رفتار سایشی مناسب، ترکیب بین فلزی مناسب بر سطح و ضخامت پوشش انتخاب گردید (جدول ۳).

پس از عملیات پوشش دادن و نفوذ آزمایش های متالوگرافی و پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروآنالیز (EDX) و اسپکتروسکوپی پلاسمایی (GDOS)، به منظور بررسی فازها و ساختارها انجام گرفت. آزمایش های سایش توسط دستگاه سایش از نوع رفت و برگشتی صورت گرفت.



شکل (۲) دیاگرام فازی سیستم آلومینیم - نیکل [۱۱]

β با فرمول Al_3Ni و ساختمان ارتورمبیک
 γ با فرمول Al_3Ni_2 و ساختمان تریگونال
 δ با فرمول $AlNi$ و ساختمان BCC
 ε با فرمول $AlNi_3$ و ساختمان FCC

۲- مواد و روش تحقیق

به منظور بررسی رفتار تریبولوژیکی فولاد ابزار کربنی C 60 W (شماره استاندارد آلمان 1.1740) پوشش داده شده توسط ترکیبات بین فلزی Fe-Al، نمونه هایی با ابعاد ۱۲×۱۱×۱ cm تهیه گردید. آنالیز شیمیایی فولاد

جدول (۱) آنالیز شیمیایی فولاد C 60 W

عنصر	%C	%Si	%Mn	%P	%S
در صد وزنی	۰/۵۵-۰/۶۵	۰/۱۵-۰/۳۵	۰/۵۵-۰/۱	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵

جدول (۲) ضخامت پوشش های نفوذی حاصل در اثر فرآیند آلومینایزینگ و آلومینایزینگ همراه با آئیل نفوذی

ضخامت پوشش (μm)	نوع عملیات	علامت اختصاری نمونه ها
۱۲۰	آلومینایزینگ (۶hr در 850°C)	AF
۱۶۰	آلومینایزینگ (۶hr در 850°C) + آئیل نفوذی (۱۲ hr در 900°C)	AF۱۲
۱۸۰	آلومینایزینگ (۶hr در 850°C) + آئیل نفوذی (۲۰ hr در 900°C)	AF۲۰
۲۰۰	آلومینایزینگ (۶hr در 850°C) + آئیل نفوذی (۲۴ hr در 900°C)	AF۲۴
۲۵۰	آلومینایزینگ (۶hr در 850°C) + آئیل نفوذی (۳۰ hr در 900°C)	AF۳۰

جدول (۳) ضخامت پوشش های نفوذی حاصل بر سطح نمونه هایی که پس از پوشش دادن با نیکل، تحت فرآیند آلومینایزینگ قرار گرفته اند.

ضخامت پوشش حاصله (μm)	زمان آئیل نفوذی (hr)	دمای فرآیند آلومینایزینگ ($^{\circ}\text{C}$)	ضخامت پوشش نیکلی (μm)	علامت اختصاری نمونه ها
۲۵۰	-	۱۰۵۰	۲۰	(AN ۱)
۲۸۰	-	۱۰۵۰	۴۰	(AN ۲)
۲۳۰	۲	۸۵۰	۲۰	(AN۲۲)
۲۵۰	۳	۸۵۰	۴۰	(AN۲۳)

۳. نتایج و بحث

فرآیند آلومینایزینگ به روش پودر فشرده بر روی نمونه‌های فولادی در دمای 800°C تا 980°C انجام می‌گیرد [۶]. جهت انتخاب درجه حرارت آلومینایزینگ آزمایش‌های متعددی در دمای 800°C تا 980°C انجام گرفت، در این آزمایش‌ها مشاهده گردید که در دمای 800°C سرعت نفوذ متقابل پوشش - زیرلایه نسبتاً کم است، از طرفی در درجه حرارت 900°C ذوب موضعی در سطح نمونه‌های فولادی اتفاق می‌افتد. به گونه‌ای که به هم ریختگی ساختار میکروسکوپی مشهود بوده و ظاهر سطح نیز نامطلوب می‌گردد. انتخاب دمای 850°C جهت آلومینایزینگ علاوه بر ایجاد شرایط مناسب برای نفوذ متقابل پوشش - زیرلایه، کیفیت سطحی مناسبی را نیز تأمین می‌کند.

زمان آلومینایزینگ نمونه‌های فولادی نیز با انجام آزمایش‌های متعدد بین ۳ تا ۱۰ ساعت انتخاب گردید. مبنای زمان آلومینایزینگ، تشکیل پوششی با ضخامت حدود $10\ \mu\text{m}$ بود که در طی فرآیند آنیل نفوذی، ضخامت آن به حدود $250\ \mu\text{m}$ افزایش یابد، تا بتواند علاوه بر بهبود رفتار تریبولوژیکی، رفتار خوردگی و اکسیداسیون را نیز بهبود بخشد. در این آزمایش‌ها مشاهده گردید که زمان ۳ ساعت جهت تشکیل پوششی با ضخامت حدود $10\ \mu\text{m}$ کافی نیست. از طرفی در زمان ۱۰ ساعت، پوشش بسیار ضخیم بر سطح تشکیل می‌گردد که دارای ترک‌های نسبتاً زیادی است، تشکیل ترک‌های مزبور با نتایج تحقیقات دیگران که آن را ناشی از تنش‌های باقیمانده زیاد در پوشش‌های ضخیم می‌دانند مطابقت دارد [۲]. زمان ۶ ساعت جهت آلومینایزینگ قطعات فولادی مناسب تشخیص داده شد. زیرا سبب تشکیل پوششی با ضخامت حدود $10\ \mu\text{m}$ بدون ایجاد ترک می‌گردد. بررسی ساختار میکروسکوپی نمونه‌های فولادی آلومینایز شده (بدون عملیات نفوذی متعاقب) نشان می‌دهد که لایه‌هایی از ترکیبات بین فلزی Fe-Al بر روی سطح تشکیل گردیده است [۱۲-۱۴]. شناسایی هر یک از لایه‌ها توسط آزمایش‌های پراش پرتو ایکس با استفاده از تکنیک لایه برداری بیانگر تشکیل ترکیب بین فلزی Fe_2Al_5 در اولین لایه و FeAl و Fe_3Al در لایه‌های بعدی می‌باشد. پس از انجام فرآیند آلومینایزینگ به منظور تشکیل ترکیبات بین فلزی مناسب بر سطح نمونه‌ها، عملیات آنیل نفوذی در دمای 900°C و زمان‌های مختلف بر روی

نمونه‌ها انجام گرفت (جدول ۲). در این آزمایش‌ها مشاهده گردید که زمان‌های کمتر از ۲۰ ساعت سبب تشکیل ساختار سه لایه‌ای متشکل از AlFe ، Al_3Fe_2 و Al_5Fe_2 می‌گردد، که لایه خارجی ترکیب بین فلزی Al_5Fe_2 می‌باشد و از تدریج بالایی برخوردار است [۲]. زمان ۳۰ ساعت و بیشتر از آن سبب تشکیل ساختار دو لایه‌ای متشکل از AlFe در لایه اول و AlFe_3 در لایه دوم می‌گردد. بنابر این زمان ۳۰ ساعت جهت آنیل نفوذی قطعات فولادی آلومینایز شده مناسب تشخیص داده شد. زیرا سبب تشکیل ترکیبات بین فلزی مناسب بر سطح می‌گردد.

نمونه‌های فولادی که ابتدا پوشش نیکلی بر سطح آنها ایجاد شده است، در دو دمای 850°C و 1050°C به مدت ۶ ساعت آلومینایز شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌هایی که در دمای 1050°C آلومینایز شده‌اند، دارای ساختار دو لایه‌ای متشکل از NiAl در اولین لایه و FeAl در دومین لایه می‌باشند. نمونه‌هایی که پس از ایجاد پوشش نیکلی بر سطح آنها، در دمای 850°C آلومینایز شده‌اند، بر سطح لایه خارجی ترکیب بین فلزی Ni_2Al_3 تشکیل شده است که از تدریج بالایی برخوردار است. با انجام عملیات آنیل نفوذی در دمای 1050°C و زمان بهینه ساختار دو لایه‌ای بر سطح نمونه‌ها ایجاد می‌گردد که NiAl در اولین لایه و FeAl در دومین لایه می‌باشد.

نتایج آزمایش‌های سایش به صورت منحنی کاهش وزن بر حسب مسافت طی شده برای نمونه خام و نمونه‌های فولادی با پوشش بهینه‌ای از ترکیبات بین فلزی در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که نمونه‌های پوشش داده شده از سایش بسیار کمتری در مقایسه با نمونه بدون پوشش برخوردارند. همچنین پوششی از ترکیبات بین فلزی Fe-Al-Ni رفتار فولاد را به نحو مؤثرتری بهبود می‌بخشد و این به دلیل تشکیل NiAl در سطح و ذرات رسوبی در پوشش می‌باشد. بررسی ضریب اصطکاک نمونه خام و نمونه‌های پوشش داده شده، نشان دهنده ضریب اصطکاک حدود $0/6$ (همراه با دامنه تغییرات وسیع) برای نمونه خام و ضریب اصطکاک حدود $0/3$ (همراه با دامنه تغییرات منظم) برای نمونه‌های فولادی با پوشش بهینه‌ای از ترکیبات بین فلزی می‌باشد (شکل ۴). علت بهبود رفتار تریبولوژیکی نمونه‌های پوشش داده شده،

افزایش سختی سطح، شیب سختی ملایم از سطح به طرف مرکز و ترد نبودن لایه های سطحی است. به منظور بررسی مکانیزم غالب سایش نمونه های مختلف، سطوح، مقاطع و ذرات سایش آنها توسط متالوگرافی و میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفته اند. در مورد فولاد عملیات سطحی نشده مکانیزم غالب سایش، ورقه ای شدن همراه با خیش خوردن و برای نمونه هایی با پوشش بهینه ای از ترکیبات بین فلزی، مکانیزم غالب سایش از نوع ورقه ای شدن همراه با سایش اکسیداسیونی می باشد.

۴ - نتیجه گیری

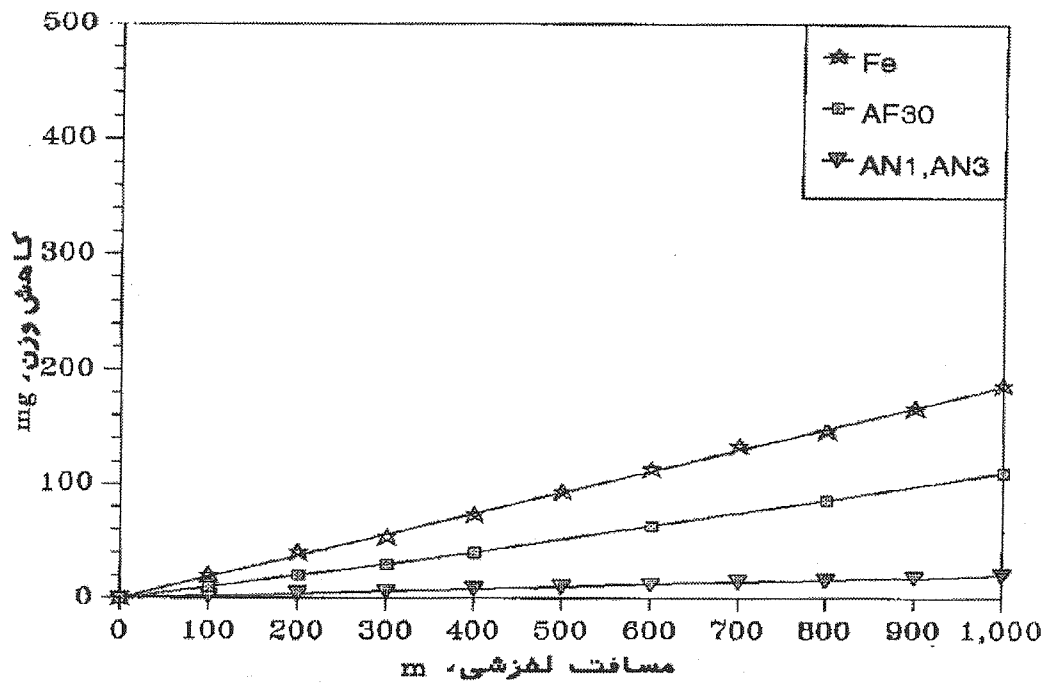
بر مبنای یافته های آزمایشی که در این پژوهش حاصل گردیده، نتایج زیر به دست آمده است:

- ۱- با اجرای یک فرآیند دو مرحله ای شامل آلومینایزینگ و سپس آتیل نفوذی می توان ترکیبات بین فلزی مناسبی از Al-Fe را در سطح فولاد بوجود آورد.
- ۲- با اجرای یک فرآیند چند مرحله ای شامل ایجاد پوشش نیکی بر سطح نمونه های فولادی و سپس آلومینایزینگ، می توان ترکیبات بین فلزی Al-Ni و Al-Fe را در سطح فولاد بوجود آورد.

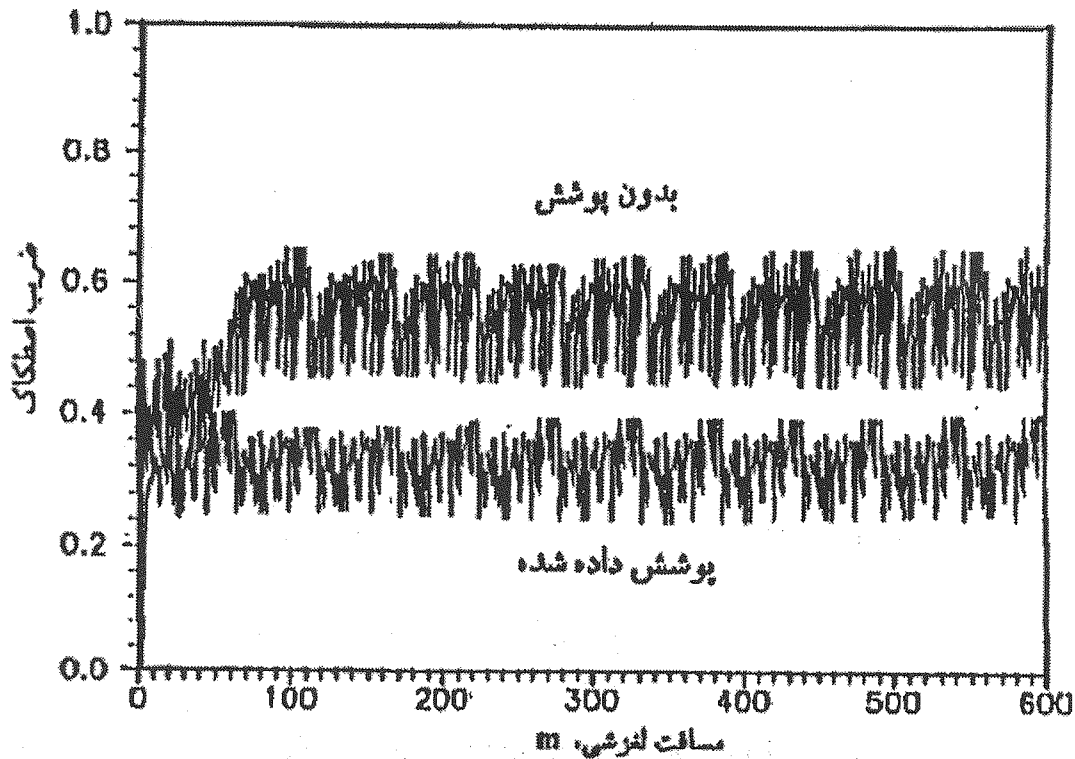
مراجع

- ۳- با ایجاد پوششی از ترکیبات بین فلزی مناسب بر سطح، سختی آن افزایش یافته در حالی که شیب سختی از سطح به سمت زیر لایه ملایم است.
- ۴- با ایجاد پوششی از ترکیبات بین فلزی AlFe₃ و AINi₂ و یا AINi₂ و AINi₂ بر سطح فولاد، رفتار تریبولوژیکی آن به نحو مؤثری بهبود می یابد. ترکیبات بین فلزی مذکور از رفتار تریبولوژیکی مناسبی برخوردارند. در حالی که Al₃Fe₂، Al₃Fe₂ و Al₃Ni₂ بسیار ترد و نامناسب هستند.
- ۵- پوششی از ترکیبات بین فلزی AINi₂ و AINi₂ در مقایسه با پوششی از ترکیبات بین فلزی AINi₂ و AINi₂ رفتار تریبولوژیکی فولاد را به نحو مؤثرتری بهبود می دهد.
- ۶- مکانیزم غالب سایش در مورد فولاد بدون پوشش ورقه ای شدن همراه با سایش خراشان از نوع خیش ریز می باشد.
- ۷- مکانیزم غالب سایش در مورد نمونه های فولادی با پوشش بهینه ای از ترکیبات بین فلزی Al-Ni و Al-Fe ورقه ای شدن همراه با سایش اکسیداسیونی می باشد.

- [1] مرتضی شمعیان اصفهانی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۵.
- [2] سید رحمان حسینی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۲.
- [3] علی زهرودی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۲.
- [4] حسین شائیلوزاده، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۳.
- [5] C.A.C Sequeira and C.M.G.S. Nunes, Surface Engineering, 1987, Vol.3, No.2, 161.
- [6] C.A.C. Sequeira and C.M.G.S. Nunes, and A.M.G. Pacheco, Surface Engineering, 1988, Vol 4, No. 1, 65.
- [7] "Aluminium-Iron Binary Diagrams", Metals Handbook, Ed.8, vol. 8.
- [8] E.S. Bartlett and H.A. Beale, Metals Handbook, Ed. 9, Vol. 5.
- [9] R. Pichoir, Materials and coatings to Resist High Temperature Corrosion, 1978, Applied Science Publishers.
- [10] S.P. Cooper and A. Strang, High Temperature Alloys for Gas Turbines, 1982, (D) Reidel Publishing Company.
- [11] "Aluminum-Nickel Binary Diagrams", Metals Handbook, Ed. 8, Vol.8.
- [12] "Aluminum Coating of Steel", Metals Handbook, Ed. 9, Vol. 5.
- [13] A. Bahadur and Coworkers, Journal of Materials Science, 1991, 28, 5375.
- [14] R. Sivakumar, N.B. Menon, and L.L. Seigle, Metallurgical Transactions, 1973, 4, 396.



شکل (۳) منحنی های مشخصه سایش مربوط به نمونه بدون پوشش، نمونه های فولادی با پوشش پهنه ای از ترکیبات بین فلزی، تحت بار $60N$



شکل (۴) نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش برای نمونه فولادی بدون پوشش و نمونه هایی با پوشش پهنه ای از ترکیبات بین فلزی (بارگذاری به صورت مرحله ای با نرخ $30N/100m$)