

رفتار تریبولوژیکی فولاد ابزار کربنی با پوشش ترکیبات بین فلزی Fe-Al

مرتضی شمعانیان اصفهانی*، مهدی صالحی** و فخرالدین اشرفی زاده**

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۷۵/۸/۲۱ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۷۶/۳/۲۴)

چکیده - استفاده از ترکیبات بین فلزی Fe-Al برای بهبود رفتار تریبولوژیکی فولاد ابزار کربنی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از روش پودر فشرده و پس از آن عملیات آنیل نفوذی در اتمسفر کنترل شده گاز آرگون و دمای 900°C استفاده شد و زمان بهینه آنیل نفوذی براساس ضخامت و رفتار تریبولوژیکی تعیین شد.

ریزساختار و نوع فازهای تشکیل شده توسط متالوگرافی، سختی سنجی، پراش پرتوی ایکس (XRD)، میکروآنالیز (EDX) و اسپکتروسکوپی پلاسمایی (GDOS) مورد شناسایی قرار گرفت. نتایج حاصل بیانگر تشکیل ساختار سه لایه ای بر سطح نمونه های آلومینایز شده است که لایه اول Al_2Fe_3 و لایه های بعدی به ترتیب AlFe و AlFe_3 هستند. همچنین در سطح نمونه ها پس از آلومینایزینگ و آنیل نفوذی در زمان بهینه ۳۰ ساعت ساختار دو لایه ای متشکل از AlFe در لایه اول و AlFe_3 در لایه دوم تشکیل شد.

نتایج آزمایشهای سایش نشان می دهد که این نوع پوشش رفتار سایشی و اصطکاکی فولاد ابزار کربنی را به نحو مؤثری بهبود داده است. به طوری که بررسی سطوح، مقاطع و ذرات سایش نشان داده است، مکانیزم غالب سایش فولاد بدون پوشش، ورقه ای شدن همراه با خیش خوردن است و مکانیزم غالب سایش در نمونه ای که پس از آلومینایزینگ در زمان بهینه آنیل نفوذی شده از نوع ورقه ای شدن همراه با سایش اکسیداسیونی است.

Tribological Behaviour of Fe-Al Intermetallic Compound Coated Carbon Tool Steel

M. Shamanian, M. Salehi and F. Ashrafi-zadeh

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

ABSTRACT- *The use of Fe-Al intermetallic compound coatings has been investigated in order to improve the tribological behaviour of carbon tool steel. The coatings were formed by a pack cementation process and*

* دانشجوی دوره دکترا ** دانشیار

subsequently diffusion annealing at 900°C in an argon controlled atmosphere. The optimum diffusion time was selected on the basis of optimum thickness and tribological behaviour.

The microstructure and the phases developed on the surface were identified by metallography, microhardness, X-ray diffraction (XRD), microanalysis (EDX) and glow discharge optical spectroscopy (GDOS) techniques. Experimental results indicate that a three layer coating is formed on the surface of the aluminized specimens, the outermost layer being identified as Fe₂Al₅ and the underlying layers as FeAl and Fe₃Al. A two layer coating was formed on the surface of the aluminized and subsequently diffusion annealed specimen at the optimum time. The FeAl and Fe₃Al have been formed on and below the surface, respectively.

The results from wear testing indicate that these coatings improve the wear and frictional behaviour of carbon steel significantly. The predominant wear mechanisms of diffusion annealed specimens were identified as delamination and oxidative wear.

۱- مقدمه

در دمای ۸۱۵ تا ۹۸۰°C و به مدت زمان لازم انجام گیرد تا ترکیبات بین فلزی مناسب بر سطح تشکیل شود، در این حالت غلظت آلومینیم در لایه های سطحی حدود ۲۵٪ است [۲-۵]. ساختارهای سطحی ایجاد شده بر روی نمونه های آلومینایز شده وجود ترکیبات بین فلزی را به وضوح نشان می دهد [۶-۱۲].

در این پژوهش سعی شده است با تغییر پارامترهای مؤثر، بهینه سازی براساس کاهش شیب سختی از سطح به سمت زمینه و با هدف بهبود رفتار تریبولوژیکی صورت گیرد. مکانیزمهای سایش غالب در هر مورد با استفاده از آزمایشهای سایش و مطالعات میکروسکوپ الکترونی تعیین شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

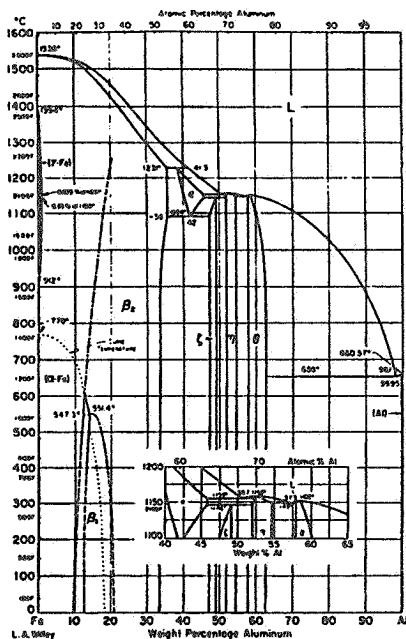
برای بررسی رفتار تریبولوژیکی فولاد ابزار کربنی (T5)، شماره استاندارد آلمان ۱/۱۷۴۰ با پوشش "ترکیبات بین فلزی Fe-Al" نمونه هایی با ابعاد ۱۲×۱۲×۱ cm تهیه شد. ترکیب شیمیایی فولاد زمینه در جدول (۱) ارائه شده است. کلیه نمونه ها تا سناده شماره ۵۰۰ پرداخت شد و قبل از پوشش دادن توسط محلول اسید کلریدریک ۵ مولار به مدت ۳۰ ثانیه اسید شویی شدند.

مخلوط پودری که در فرایند آلومینایزینگ استفاده شد متشکل از Al، NH₄Cl و Al₂O₃ بود. در جدول (۲) مشخصات و مقادیر پودرهای مورد استفاده ارائه شده است. شرایط بهینه پوشش دادن با انجام آزمایشهای متعدد پوششدهی براساس ضخامت و رفتار

خواص تریبولوژیکی لایه سطحی عمدتاً بستگی به سازگاری آنها با زیر لایه دارد. توسعه پوششهای ترکیبات بین فلزی^۱ در سالهای اخیر به لحاظ کاهش شیب سختی مورد توجه قرار گرفته است. این نوع پوششها در دسته پوششهای نفوذی^۲ فلزی قرار می گیرند و در مقایسه با پوششهای متداول سرامیکی که نوعاً از شیب تندی در خواص فیزیکی یا مکانیکی در فصل مشترکها برخوردارند و به تبع آن، استحکام چسبندگی ضعیفی با زمینه دارند، از فصل مشترک با شیب ملایم در خواص بین پوشش و زمینه برخوردارند.

پوشش دادن با ترکیبات بین فلزی Fe-Al (شکل ۱) [۱] اخیراً به منظور بهبود رفتار سایشی فولادها مورد توجه قرار گرفته است [۲]. به منظور پوشش دادن سطح قطعات فولادی توسط آلومینیم روشهای مختلفی وجود دارد که از آن جمله می توان فرایند پودر فشرده را نام برد که در آن مخلوط پودری متشکل از Al، NH₄Cl و Al₂O₃ است. در طی عملیات آلومینایزینگ، قطعه داخل مخلوط پودری قرار گرفته و جعبه حاوی پودر و قطعه در دمای ۸۰۰ تا ۹۸۰°C و به مدت زمان ۲ تا ۲۴ ساعت حرارت داده می شود، در این حالت غلظت بالایی از آلومینیم در حدود ۵۰ تا ۶۰٪ در سطح قطعه ایجاد می شود [۳-۵].

به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی غنی از آلومینیم که دارای تردی بالایی هستند لازم است عملیات آنیل نفوذی^۳ بر روی قطعات



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

شکل ۱- نمودار فازی سیستم آهن - آلومینیم [۱]

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد T_5

C	Si	Mn	P	S	عنصر
۰/۵۵-۰/۶۵	۰/۱۵-۰/۳۵	۰/۵۵-۰/۸	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	درصد وزنی

رفت و برگشتی صورت گرفت.

سیستم GDOS، امروزه یکی از پیشرفته ترین دستگاههای تحلیل شیمیایی محسوب می شود که قادر به تحلیل تغییرات ترکیب عنصری در لایه های نازک، در فصل مشترک لایه با زیر لایه و در حجم است [۱۳ و ۱۴]. دقت دستگاه GDOS-750 در اندازه گیری ترکیب شیمیایی و لایه برداری به ترتیب ۰/۰۱ درصد و $10^\circ A$ است. در این روش نمونه در یک محفظه کم فشار به عنوان کاتد قرار گرفته و گاز آرگون وارد محفظه می شود. با اعمال یک ولتاژ نسبتاً بالا بین آند و کاتد، گاز آرگون یونیزه شده و یونهای شتابدار آن، نمونه را بمباران می کنند. در نتیجه این امر اتمهای هدف از سطح جدا شده و متعاقباً در هاله پلاسما برانگیخته می شوند. کنده شدن اتمهای هدف منجر به ایجاد حفره هایی می شود که توسط میکروسکوپ الکترونی و حتی میکروسکوپ نوری نیز قابل رویت اند. الکترونها حاصل از اتمهای برانگیخته شده مزبور توسط مجموعه ای از آینه های مسطح و مقعر، کانونی و هدایت

جدول ۲- مشخصات و مقادیر پودرهای مورد استفاده

نام پودر	دانه بندی (μm)	مقدار (wt%)
اکسید آلومینیم	۱۸۰	۸۵
آلومینیم	۶۵	۱۰
کلرید آمونیم	۲۴۰	۵

تریبولوژیکی تعیین شد. فرایند آلومینایزینگ در دمای $850^\circ C$ و به مدت ۶ ساعت انجام یافت. پس از آن به منظور انجام آنیل نفوذی، نمونه ها در دمای $900^\circ C$ و زمان ۲ تا ۳۵ ساعت در کوره لوله ای مقاومتی با اتمسفر کنترل شده گاز آرگون قرار گرفتند و بهترین زمان آنیل نفوذی انتخاب شد (جدول ۳).

آزمایشهای متالوگرافی و پراش پرتوی ایکس (XRD) و میکرو آنالیز (EDX)، اسپکتروسکوپی پلاسمایی^۴ (GDOS)، به منظور بررسی فازها و ساختارهای حاصله پس از عملیات پوششدهی و نفوذ انجام گرفت. آزمایشهای سایش توسط دستگاه سایش از نوع

جدول ۳- ضخامت پوششهای نفوذی حاصله در اثر فرایند آلومینایزینگ همراه با آنیل نفوذی

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

جدول ۴- ترکیب شیمیایی عضو مقابل، فولاد ۵۲۱۰۰

عنصر	Ni	Cu	P	S	Mn	Si	Cr	C
درصدوزنی	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	۰/۳	۰/۳	۱/۳۳	۰/۹

بود. تحلیل عنصری لایه های تشکیل شده بر سطح نمونه های پوشش داده شده با استفاده از سیستم میکروآنالیز (EDX) دستگاه میکروسکوپ الکترونی از نوع Philips XL30 انجام شد. آزمایشهای سایش در شرایط خشک با استفاده از دستگاه سایش رفت و برگشتی تحت بارهای ۶۰، ۱۲۰ و ۳۰۰ نیوتن انجام گرفت. عضو مقابل در آزمایشهای سایش فولاد بلبرینگ (۵۲۱۰۰) با سختی ۶۳RC است. ترکیب شیمیایی فولاد بلبرینگ در جدول (۴) آورده شده است. به منظور تشخیص مکانیزم غالب سایش، سطوح، مقاطع و ذرات سایش توسط میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند.

۳- نتایج

بررسی ساختار میکروسکوپی نمونه های فولادی آلومینایز شده (بدون عملیات نفوذی متعاقب) نشان می دهد که لایه هایی از ترکیبات بین فلزی Fe-Al با ضخامت مجموعاً $110\mu\text{m}$ بر روی سطح تشکیل شده است (شکل ۲). شناسایی فازها در هر یک از لایه ها به تفکیک، با استفاده از آزمایشهای پراش پرتوی ایکس به همراه تکنیک لایه برداری صورت پذیرفت (شکل ۳). همان گونه که مشاهده می شود در اولین لایه ترکیب بین فلزی Fe_3Al_5 در دومین لایه ترکیب بین فلزی FeAl و در سومین لایه ترکیب بین فلزی

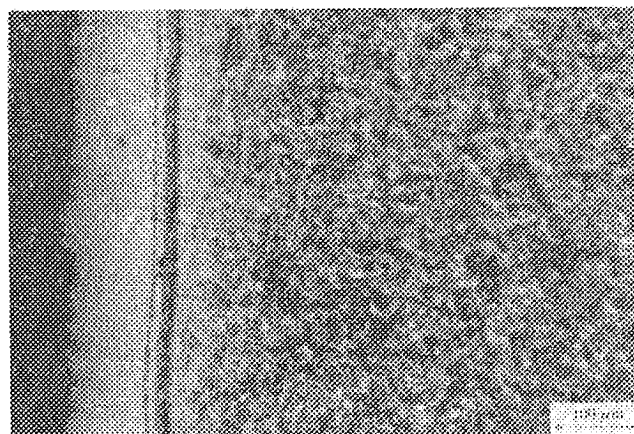
شده و به صورت متصل به یک اسپکترومتر گسیل می شوند. سپس الکترونها به صورت تک رنگ به یک تکثیر کننده فوتون هدایت می شوند. بالاخره بعد از طی مراحل مختلفی به صورت طول موجهای متعدد به یک دستگاه ثبات ارسال و در آنجا به صورت شدت نسبی برحسب طول موج و یا شدت نسبی برحسب زمان نمایش داده می شوند. لذا بر این مبنا که شدت هر طیف مشخصی از یک عنصر هدف متناسب با چگالی آن عنصر در ناحیه ای است که تحت پلاσμα قرار گرفته، نتیجتاً درصد وزنی آن عنصر مشخص می شود. همچنین با مشخص بودن نرخ پراکنش می توان محور افقی (زمان) را به صورت فاصله از سطح نمونه درجه بندی کرد. نرخ پراکنش بستگی به ولتاژ، جریان و ترکیب شیمیایی نمونه داشته و معمولاً بین $500-10\text{ A/sec}$ است. در این پژوهش، نمونه های مورد استفاده برای تحلیل GDOS در ابعادی به قطر 3cm و ضخامت 0.5cm انتخاب شدند و پس از عملیات سطحی مورد تحلیل قرار گرفتند. در این دستگاه ناحیه ای از نمونه های مزبور به قطر 8mm تحت تحلیل واقع شده است.

شناسایی فازهای موجود در منطقه نفوذی توسط دستگاه پراش پرتو ایکس (Shimadzu XD-610) و با استفاده از پرتو $\text{CuK}\alpha$ با طول موج 1.5405 \AA صورت پذیرفت. ولتاژ و جریان اعمالی به ترتیب 40KV و 40mA و نرخ روبش طی تحلیل نیز 1deg/min

ترکیبات بین فلزی میزان سایش نمونه را در مقایسه با نمونه خام در حدود ۴۰ درصد کاهش داده است. منحنی ضریب اصطکاک برحسب مسافت لغزش برای نمونه خام و نمونه ای که پس از آلومینایزینگ به مدت ۳۰ ساعت آنیل نفوذی شده در شکل (۹) نشان داده شده است و نشان دهنده کاهش ضریب اصطکاک نمونه های پوشش داده شده در مقایسه با نمونه های خام است. شکل (۱۰ - الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سطح سایش فولاد T5 عملیات نشده را نشان می دهد. در این تصویر ذرات ورقه ای شکل همراه با حفره های زیاد به وضوح مشاهده می شوند. شکل های (ب) و (ج) به ترتیب نمایانگر خرده های سایش و سطح سایش بین مقابل فولاد عملیات نشده اند. انتقال ذرات سایش پوشش به عضو مقابل و ذرات ورقه ای شکل همراه با حفره های زیاد در این تصاویر قابل مشاهده اند. شکل (۱۰ - د) ساختار میکروسکوپی زیر سطح سایش مربوط به همان نمونه بوده که نشان دهنده تغییر شکل پلاستیکی در زیر سطح مقطع سایش است.

شکل (۱۱ - الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی از فصل مشترک سطح سایش با قسمت ساییده نشده مربوط به نمونه آلومینایز شده است که پس از مسافت لغزش کمی، پوشش سطحی آن به شدت تخریب شده است. شکل (۱۱ - ب) ذرات سایش همان نمونه را نشان می دهد که بیانگر ذراتی بدون حفره و بدون تغییر شکل پلاستیکی است. شکل (۱۱ - ج) سطح سایش بین مقابل و شکل (۱۱ - د) ساختار میکروسکوپی زیر سطح سایش همان نمونه را نشان می دهند که به ترتیب نشان دهنده عدم انتقال ذرات سایش پوشش به عضو مقابل و عدم تغییر شکل پلاستیک در زیر سطح مقطع سایش اند.

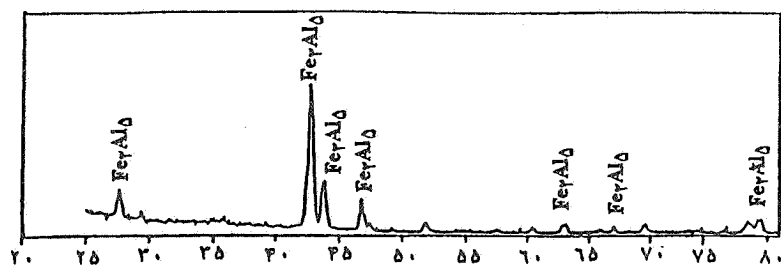
شکل (۱۲ - الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش نمونه فولادی را که پس از آلومینایزینگ در زمان بهینه آنیل نفوذی شده است و تشکیل ذرات ورقه ای شکل همراه با حفره های متعدد را نشان می دهد. در این مطالعات همچنین ذرات سایش ورقه ای شکل همراه با حفره های زیاد مشاهده شده است (شکل ۱۲ - ب). شکل (۱۲ - ج) سطح سایش بین مقابل و شکل (۱۲ - د) ساختار میکروسکوپی زیر سطح سایش همان نمونه را نشان می دهد. در شکل (۱۲ - د) تغییر شکل پلاستیک در زیر سطح مقطع



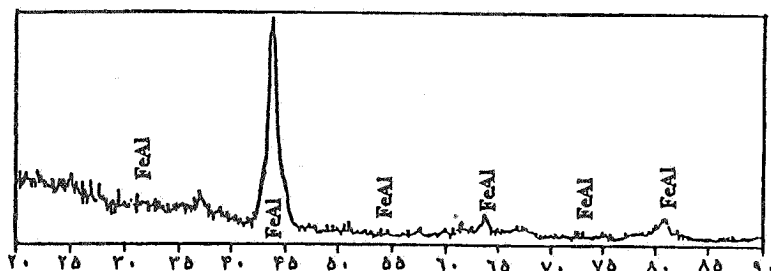
شکل ۲- ریز ساختار پوشش های نفوذی آلومینیم بر روی فولاد، مخلوط پودری متشکل از ۱۰٪ Al، ۵٪ NH₄Cl و ۸۵٪ Al₂O₃ و زمان عملیات آلومینایزینگ ۶ ساعت است.

Fe₃Al آشکار شده اند. نتایج آزمایش اسپکتروسکوپی پلاسمایی بر روی نمونه آلومینایز شده در شکل (۴) نشان داده شده است. پس از انجام فرایند آلومینایزینگ به منظور تشکیل ترکیبات بین فلزی مناسب بر سطح نمونه ها، عملیات آنیل نفوذی در دمای ۹۰۰°C و زمانهای مختلف بر روی نمونه ها انجام گرفت (جدول ۳). در شکل (۵) سطح مقطع متالوگرافی نمونه ای که پس از آلومینایزینگ در زمان بهینه ۳۰ ساعت آنیل نفوذی شده، بیانگر تشکیل ساختار دو لایه ای بر سطح است. انجام آزمایشهای پراش پرتوی ایکس بر روی دو لایه تشکیل شده بر سطح نمونه مذکور نتایج مشابهی با شکل های (ب) و (ج) دارد، یعنی لایه اول ترکیب بین فلزی FeAl و لایه دوم ترکیب بین فلزی Fe₃Al است. نتایج آزمایش اسپکتروسکوپی پلاسمایی بر روی نمونه ای که پس از آلومینایزینگ به مدت ۳۰ ساعت آنیل نفوذی شده است (شکل ۶) بیانگر کاهش شیب غلظتی آلومینیوم از سطح به طرف عمق در مقایسه با نمونه ای است که فقط آلومینایز شده (شکل ۴) است. شکل (۷) منحنیهای شیب سختی مقاطع، از سطح به سمت زمینه، مربوط به نمونه های فولادی آلومینایز شده همراه با زمانهای مختلف آنیل نفوذی را نشان می دهد (جدول ۳).

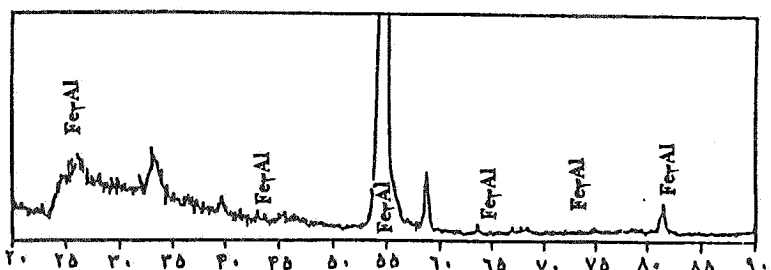
نتایج آزمایشهای سایش به صورت منحنی کاهش وزن برحسب مسافت طی شده برای نمونه خام و نمونه های پوشش داده شده که در شکل (۸) آورده شده است بیانگر آن است که پوشش بهینه ای از



(الف)



(ب)



(ج)

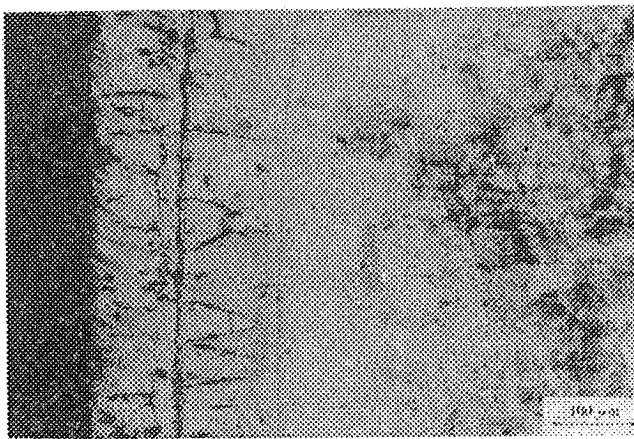
شکل ۳- نتایج آزمایش پراش پرتوی ایکس بر روی نمونه فولادی آلومینایز شده
 (الف) لایه اول (ب) پس از اولین لایه برداری (ج) پس از دومین لایه برداری

سایش به وضوح مشاهده می شود.

پوشش - زیر لایه موجب ایجاد کیفیت سطحی مناسبی نیز می شود.
 مبنای زمان آلومینایزینگ تشکیل پوششی با ضخامت حدود $100\mu\text{m}$ بود که در طی فرایند آتیل 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 شد که زمان ۳ ساعت برای تشکیل پوششی با ضخامت حدود $100\mu\text{m}$ کافی نیست. از طرفی در زمان ۱۰ ساعت پوشش بسیار ضخیم بر سطح تشکیل می شود که دارای ترکهای نسبتاً زیادی است. تشکیل ترکهای مزبور با نتایج به دست آمده توسط سایر محققان که آن را ناشی از تنشهای باقیمانده زیاد در پوششهای ضخیم می دانند مطابقت دارد [۴]. زمان ۶ ساعت برای آلومینایزینگ قطعات فولادی مناسب تشخیص داده شد زیرا مطابق شکل (۲)

۴- بحث

فرایند آلومینایزینگ به روش پودر فشرده بر روی نمونه های فولادی در دمای 800°C تا 980°C انجام می گیرد [۴]. برای انتخاب دمای آلومینایزینگ آزمایشهای متعددی در دمای 800°C تا 980°C انجام گرفت. در این آزمایشها مشاهده شد که در دمای 800°C سرعت نفوذ متقابل پوشش - زیر لایه نسبتاً کم بوده ولی از طرفی در دمای 900°C ذوب موضعی در سطح نمونه های فولادی اتفاق می افتد به گونه ای که به هم ریختگی ساختار میکروسکوپی مشهود است و سطح نیز ظاهر نامطلوبی دارد. انتخاب دمای 850°C برای آلومینایزینگ علاوه بر ایجاد شرایط مناسب برای نفوذ متقابل

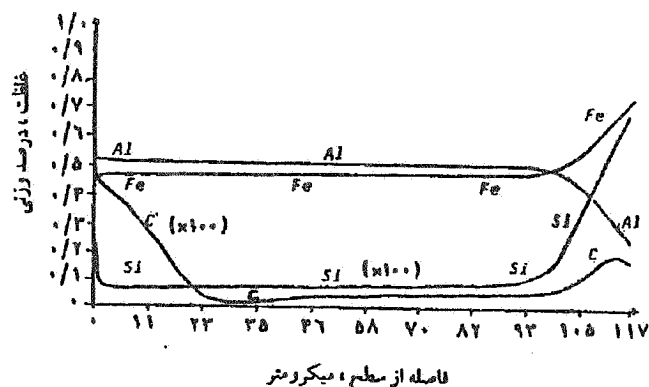


شکل ۵- ریز ساختار پوشش های نفوذی آلومینیم بر روی فولاد که پس از عملیات آلومینایزینگ، به مدت ۳۰ ساعت آنیل نفوذی شده است.

برخوردار است ترکیب بین فلزی Fe_7Al_5 است. انجام عملیات آنیل نفوذی بر روی نمونه های آلومینایز شده (شکل ۶) ضمن کاهش درصد آلومینیم در لایه های سطحی، عمق نفوذ آلومینیم را افزایش داده و ضخامت پوشش زیادتر می شود (شکل ۵). نفوذ متقابل آهن و آلومینیم نقش مهمی را در چسبندگی پوشش به زیر لایه ایفا می کند. مشاهده تغییرات غلظت کربن و سیلیسیم در شکل های (۴) و (۶) نشان دهنده تمایل کربن و سیلیسیم برای انباشته شدن در سطح است، پدیده حرکت یک عنصر در خلاف شیب غلظتی خود که به "نفوذ سربالایی" موسوم است، توسط برخی محققان در مورد سیستم $Fe-C-Si$ مشاهده شده است [۱۵].

مطالعه شیب سختی از سطح پوشش به سمت زمینه برای نمونه فولادی آلومینایز شده و نمونه هایی که پس از آلومینایزینگ در زمانهای مختلف آنیل نفوذی شده اند (شکل ۷) نشان می دهد که با افزایش زمان آنیل نفوذی عمق نفوذ افزایش یافته، منتهی سختی سطح از ۸۲۵HV در نمونه آلومینایز شده به ۵۱۰HV در نمونه ای که پس از آلومینایزینگ به مدت ۳۰ ساعت آنیل نفوذی شده، کاهش می یابد. علت این تغییر سختی تبدیل ترکیب بین فلزی Fe_7Al_5 به ترکیب بین فلزی $FeAl$ در اثر آنیل نفوذی است. همچنین استفاده از عملیات آنیل نفوذی بر روی نمونه های آلومینایز شده سبب می شود که شیب تغییرات سختی از سطح به سمت زمینه ملایم شود.

اندازه گیری ضریب اصطکاک نمونه عملیات سطحی نشده نشان می دهد که یک عدد ثابت برای ضریب اصطکاک آنها نمی توان



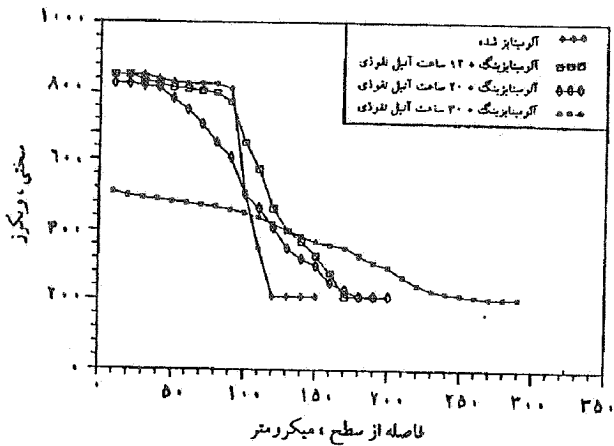
فاصله از سطح، میکرومتر

شکل ۴- نمودار تغییرات غلظت عناصر در پوشش های نفوذی آلومینیم تشکیل شده بر سطح فولاد آلومینایز شده از سطح به سمت زمینه که توسط اسپکتروسکوپی پلاسمایی انجام گرفته است.

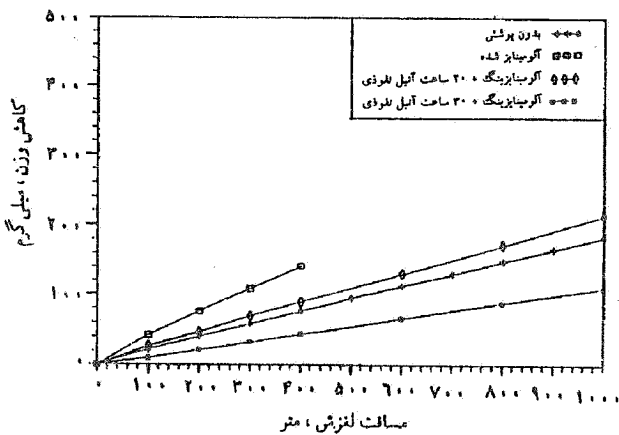
سبب تشکیل پوششی به ضخامت حدود $10 \mu m$ و فاقد ترک می شود.

پس از انجام فرایند آلومینایزینگ ساختار سه لایه ای بر سطح نمونه های فولادی تشکیل می شود (شکل ۲). بر اساس مطالعات انجام شده (شکل ۳) لایه خارجی ترکیب بین فلزی Al_5Fe_7 است که از تردی بالایی برخوردار است. آزمایش سایش بر روی نمونه مزبور افت مقاومت سایشی را نشان می دهد (شکل ۷). ترکیبات بین فلزی مناسب بر سطح نمونه های فولادی آلومینایز شده در دما و زمان بهینه آنیل نفوذی تشکیل می شود. این ترکیبات بین فلزی از درصد آلومینیم کمتری که انعطاف پذیری بالاتری را نشان می دهند تشکیل می شوند. در این آزمایشها مشاهده شد که زمان ۳۰ ساعت و بیشتر از آن سبب تشکیل ساختار دو لایه ای (شکل ۵) بر سطح می شود که لایه اول $AlFe$ و لایه دوم $AlFe_3$ (مشابه شکل های ۳-ب و ۳-ج) است. انجام آزمایشهای سایش مطابق شکل (۸) نشان می دهد که میزان سایش نمونه ای با این نوع پوشش نسبت به نمونه بدون پوشش در حدود ۴۰ درصد کاهش یافته است.

بررسی رفتار نفوذی در مورد نمونه فولادی آلومینایز شده (شکل ۴) بیانگر تشکیل ترکیبی از ترکیبات بین فلزی آهن - آلومینیم با غلظت آلومینیم و آهن ۵۰ درصد وزنی تا عمق حدود $95 \mu m$ است که پس از آن غلظت آلومینیم سریعاً افت می کند. با توجه به نمودار فازی سیستم آهن - آلومینیم (شکل ۱) نتیجه می شود که لایه اول که از ضخامت و غلظت آلومینیم بالایی



شکل ۷- نمودارهای شیب سختی از سطح پوشش به سمت زمینه مربوط به نمونه هایی که پس از آلومینایزینگ، در زمانهای مختلف آنیل نفوذی شده اند.



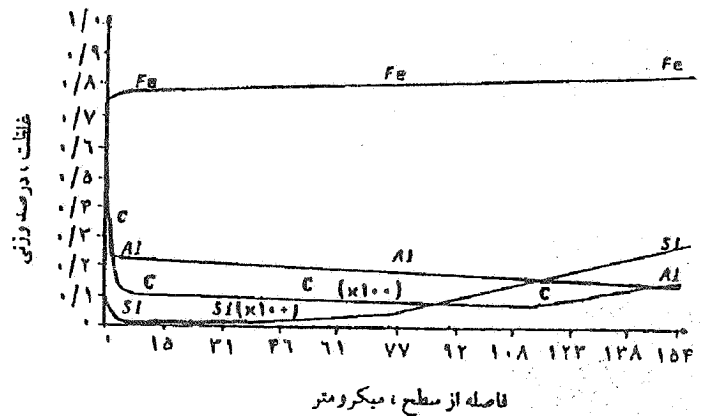
شکل ۸- منحنیهای مشخصه سایش مربوط به نمونه بدون پوشش، نمونه آلومینایز شده و نمونه هایی که پس از آلومینایزینگ، آنیل نفوذی شده اند. (تحت بار ۶۰ N).

- خرده سایش (اندازه و شکل آنها)

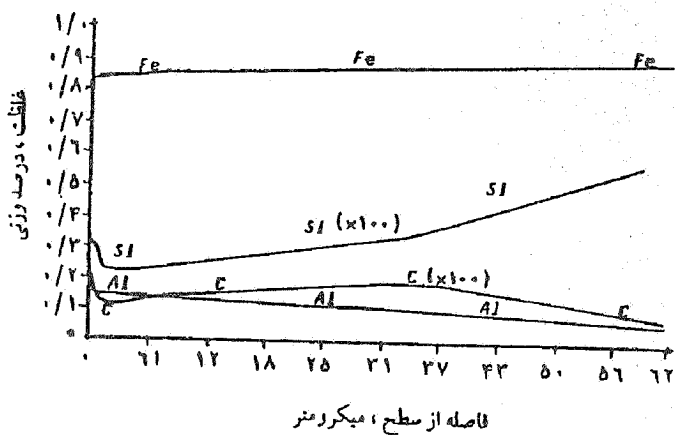
- مقطع زیر سطح سایش

در این پژوهش این سه عامل با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، متالوگرافی و میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند و در حد امکان مکانیزمهای سایش غالب مشخص شده اند که در ادامه شرح داده شده است.

بررسی سطح سایش فولاد عملیات سطحی نشده (شکل ۱۰ - الف) شیارهایی را نشان می دهد که به موازات جهت سایش بوده و



(الف)



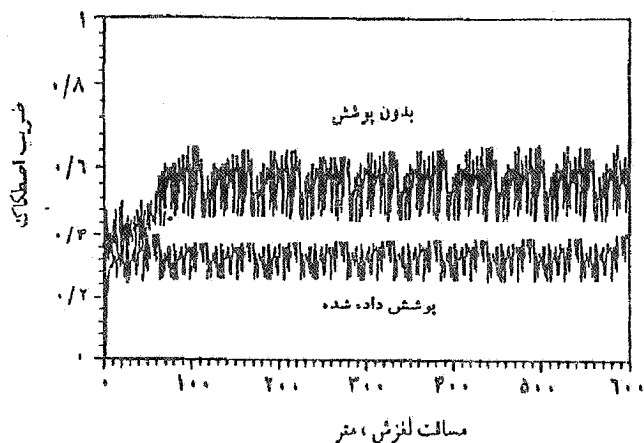
(ب)

شکل ۶- نمودار تغییرات غلظت عناصر در پوششهای نفوذی آلومینیم تشکیل شده بر سطح نمونه فولادی که پس از آلومینایزینگ به مدت ۳۰ ساعت آنیل نفوذی شده است. تغییرات از سطح به سمت زمینه و توسعه اسپکتروسکوپی پلاسمایی صورت گرفته است.

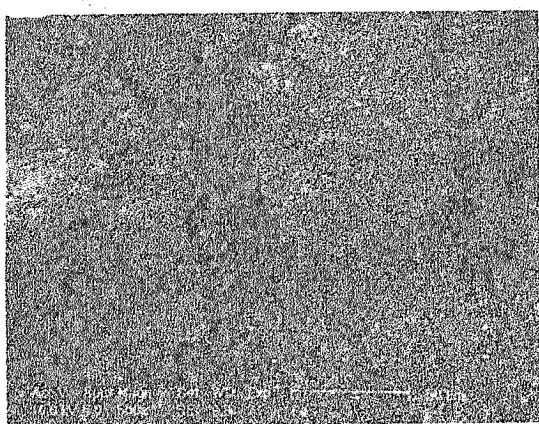
(الف) از سطح تا عمق ۱۵۴ μm (ب) از عمق ۱۵۴ تا عمق ۲۱۷ μm

تعیین کرد. تغییرات ضریب اصطکاک در حین لغزش زیاد بوده و از ۰/۲۸ الی ۰/۶۶ تغییر می کند. استفاده از پوشش نفوذی بهینه بر سطح فولاد علاوه بر کاهش ضریب اصطکاک باعث شده که دامنه تغییرات آن نیز کمتر و منظمتر شود (از ۰/۲۵ الی ۰/۴). به نظر می رسد که فازهایی که در طی این فرایند پدید آمده اند، علاوه بر مقاومت سایشی خوب دارای ضریب اصطکاک کمی نیز هستند. عوامل مهمی که می توان توسط آنها مکانیزم سایش غالب ۵ را در یک تریبو سیستم مشخص کرد عبارت اند از بررسی:

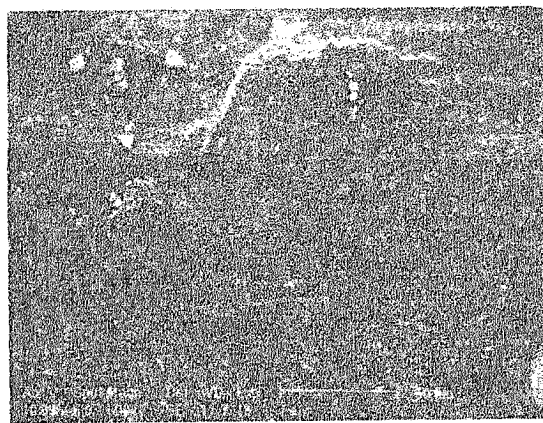
- سطح مقطع سایش (نمونه و عضو مقابل)



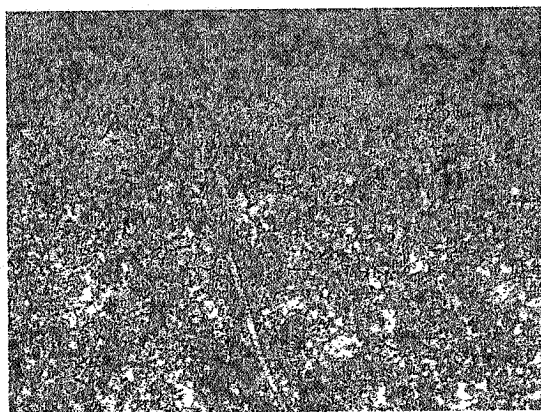
شکل ۹- نمودار ضریب اصطکاک برحسب مسافت لغزش برای نمونه فولادی بدون پوشش و نمونه ای با پوشش بهینه از ترکیبات بین فلزی Fe-Al (بارگذاری به صورت مرحله ای با نرخ $30\text{ N}/1000\text{ m}$)



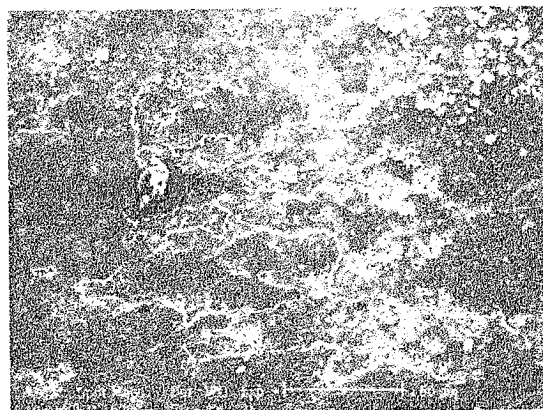
(ب)



(الف)

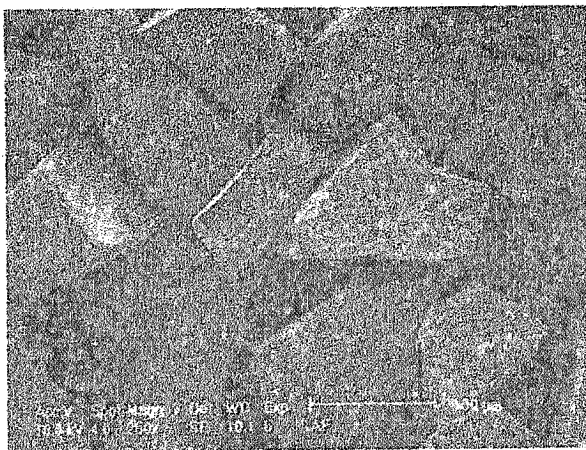


(د)

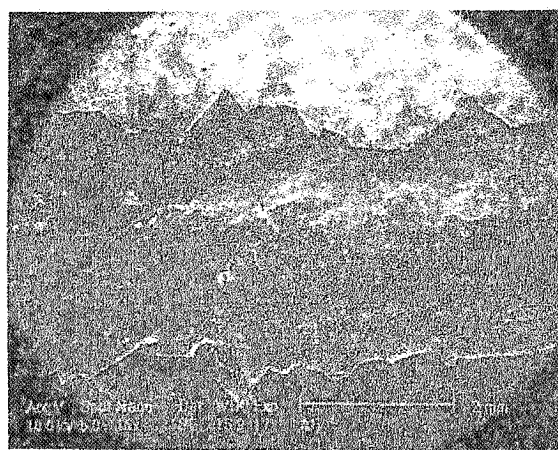


(ج)

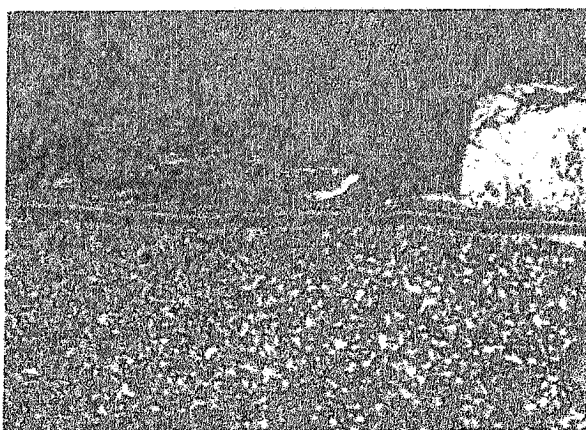
شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی فولاد عملیات نشده
(الف) سطح سایش (ب) خرده های سایش (ج) عضو مقابل (د) زیر سطح سایش



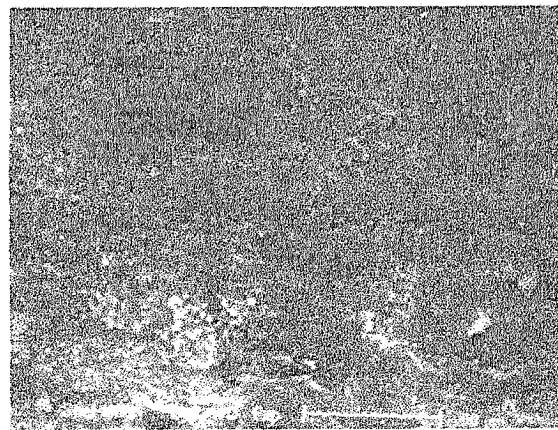
(ب)



(الف)



(د)

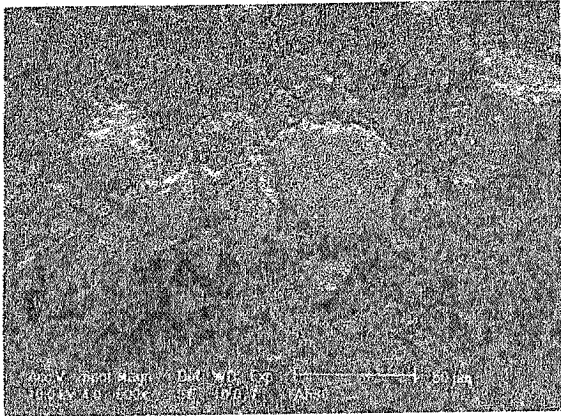


(ج)

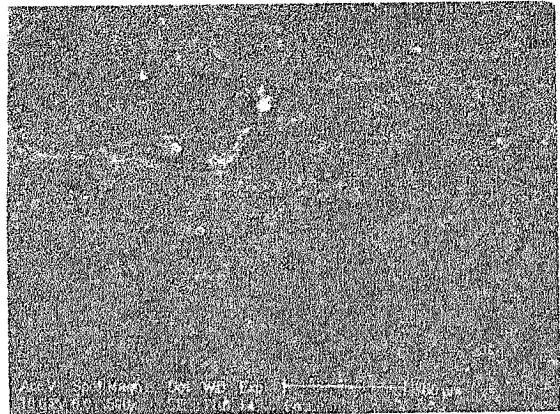
شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی فولاد آلومینایز شده
(الف) سطح سایش (ب) خرده های سایش (ج) عضو مقابل (د) زیر سطح سایش

(ج) آثار انتقال ماده و تغییر شکل پلاستیکی آنها را در سطح نشان می دهد که خود حاوی حفره های زیاد و پراکنده اند. مشاهده سطح مقطع زیر سطح سایش (شکل ۱۰ - د) نشان دهنده حوزة تغییر شکل پلاستیکی در زیر سطح سایش است. جمع بندی این مشاهدات روشن می سازد که در مورد فولاد عملیات سطحی نشده مکانیزم غالب سایش، ورقه ای^۶ شدن همراه با خیش خوردن است. لازم به ذکر است که ورقه ای شدن به عنوان یک مکانیزم غالب در سایش فولاد مورد تأیید سایر محققان نیز هست [۱۶].
با توجه به شکل (۸) مشاهده می شود که در مورد نمونه ای که فقط تحت عملیات آلومینایزینگ (بدون عملیات حرارتی نفوذی)

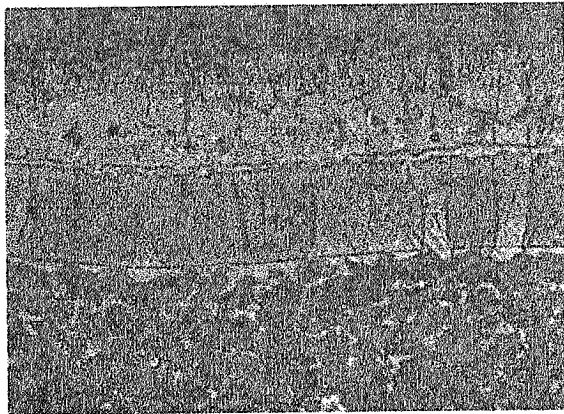
برآمدگی ماده نیز هم جهت با آنها وجود دارد. همچنین آثار چسبندگی در سطح وجود دارد و سوراخهای نسبتاً ریزی در سطح مشاهده می شود. مشاهده سطح سایش در بزرگنمایی بالاتر تغییر شکل پلاستیکی و حرکت ماده را در جهت سایش نشان می دهد. محلهایی از جدا شدن ماده به صورت ورقه ای در سطح وجود دارد که خود حاوی حفره ها و سوراخهای ریزترند. ملاحظه خرده های سایش فولاد (شکل ۱۰ - ب) نشان می دهد که آنها عموماً به صورت ورقه ای با شکل منظم بوده و دارای لبه های دندانه دار هستند. مطالعات توپوگرافی این خرده ها نشان می دهد که آنها حاوی سوراخها و ترکهای زیادی اند. بررسی سطح عضو مقابل (شکل ۱۰



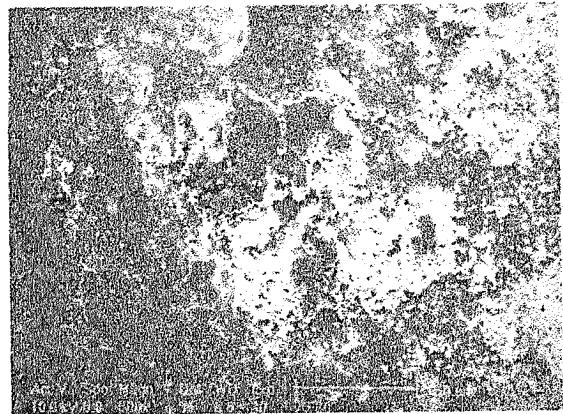
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه ای که پس از آلومینایزینگ در زمان بهینه آنیل نفوذی شده است.
(الف) سطح سایش (ب) خرده های سایش (ج) عضو مقابل (د) زیر سطح سایش

منطقه است. جمع بندی این مشاهدات روشن می سازد که در مورد فولاد آلومینایز شده مکانیزم غالب سایش، خراشان^۷ از نوع ترک ریز^۸ است.

در مورد نمونه ای که پس از آلومینایزینگ در زمان بهینه آنیل نفوذی شده است، بررسی رفتار سایشی مطابق شکل (۸) نشان می دهد که میزان سایش در مقایسه با نمونه بدون پوشش در حدود ۴۰ درصد کاهش یافته است. این به دلیل تشکیل ترکیب بین فلزی مناسب بر سطح (FeAl) همراه با شیب سختی ملایم از سطح به طرف زمینه است (شکل ۷).

بررسی سطح سایش این نمونه (شکل ۱۲ - الف) نشان می دهد که

قرار گرفته است میزان سایش حتی از نمونه بدون پوشش نیز بیشتر است. این به دلیل تشکیل ترکیب بین فلزی Al_5Fe_7 بر سطح است که از تردی بالایی برخوردار است. بررسی سطح سایش (شکل ۱۱ - الف) این نمونه بیانگر عدم تغییر شکل پلاستیکی در اطراف شیار سایش و زیادتر بودن میزان یا حجم ذرات سایش در مقایسه با حجم شیار ایجاد شده در سطح است. ملاحظه خرده های سایش (شکل ۱۱ - ب) نشان می دهد که آنها عمدتاً به صورت ذراتی بزرگ و بدون حفره اند. مشاهده عضو مقابل نشان دهنده عدم انتقال فلز به فلز است (شکل ۱۱ - ج). همچنین مشاهده مقطع زیر سطح سایش (شکل ۱۱ - د) نشان دهنده عدم تغییر شکل پلاستیکی در این

۵- نتیجه گیری

الف - انجام عملیات آلومینایزینگ همراه با آنیل نفوذی بهینه سبب افزایش سختی سطح از HV ۲۰۰ (فولاد بدون پوشش) به حدود HV ۵۱۰ می شود.

ب - مرفولوژی لایه های تشکیل شده بر روی فولاد بیانگر ساختار لایه ای است.

ج - انجام عملیات آلومینایزینگ همراه با آنیل نفوذی بهینه سبب بهبود رفتار سایشی و اصطکاکی فولاد می شود

د - مکانیزم غالب سایش فولاد بدون پوشش ورقه ای شدن همراه با خیش خوردن است.

ه- مکانیزم غالب سایش فولاد آلومینایز شده سایش خراشان از نوع ترک ریز و نمونه ای که پس از آلومینایزینگ در زمان بهینه آنیل نفوذی شده است سایش ورقه ای همراه با سایش اکسیداسیونی است.

تکه هایی از پوشش به صورت ورقه ای در حال جدا شدن از سطح هستند. ملاحظه خورده های سایش (شکل ۱۲ - ب) نشان می دهد که آنها عموماً به صورت ورقه ای همراه با خورده های سایش ریز و کروی شکل هستند. وجود خورده های سایش ریز که دلالت بر سایش اکسیداسیونی دارند ممکن است از نمونه اصلی انتقال پیدا کرده و یا ممکن است خورده های سایش پین باشند. مشاهده عضو مقابل نشان می دهد که خورده های سایش ریز و کروی شکل در آن وجود دارد (شکل ۱۲ - ج). همچنین بررسی سطح مقطع زیر سطح سایش (شکل ۱۲ - د) نشان دهنده تغییر شکل پلاستیکی در زیر سطح است. جمع بندی این مشاهدات روشن می سازد که در مورد نمونه ای که پس از آلومینایزینگ در زمان بهینه آنیل نفوذی شده است مکانیزم غالب سایش از نوع ورقه ای شدن همراه با سایش اکسیداسیونی^۹ است.

واژه نامه:

1- intermetallic compounds	Spectroscopy (GDOS)	7- abrasive
2- diffusion coatings	5- predominant wear	8- microcracking
3- diffusion annealing	mechanism	9- oxidative wear
4- Glow Discharge Optical	6- delamination	

مراجع

1. "Aluminium-Iron Binary Diagrams", *Metals Handbook*, 8th Ed., Vol. 8, pp. 260.
۲. مرتضی شمعیان اصفهانی، مهدی صالحی، فخرالدین اشرفی زاده، "رفتار تریبولوژیکی فولاد ابزار کربنی دارای پوششی از ترکیبات بین فلزی Fe-Al" مجموعه مقالات سمپوزیوم فولاد ۷۵، دانشگاه صنعتی اصفهان، صفحه ۳۶۸، ۱۳۷۵.
۳. مرتضی شمعیان اصفهانی، فخرالدین اشرفی زاده، مهدی صالحی، "مقایسه رفتار تریبولوژیکی فولاد ابزار کربنی دارای پوششهایی از ترکیبات بین فلزی Fe-Al و Fe-Al-Ni" مجموعه مقالات دومین سمینار ملی مهندسی سطح، دانشگاه تهران، صفحه ۴۰۹، ۱۳۷۶.
4. Sequeira, C. A. C., and Nunes, C. M. G. S., "Formation of Diffusion Coatings on Iron and Steel: 1 Formation Processes", *Surface Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 161-166, 1987.
5. Sequeira, C. A. C., Nunes, C. M. G. S. and Pacheco, A. M. G., "Formation of Diffusion Coatings on Iron and Steel.: 3 Aluminum, Chromium and Zinc Coatings," *Surface Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 65-81, 1988.
6. Aluminum Coating of Steel", *Metals Handbook*, 9th Ed., Vol. 5, pp. 333.
7. Bahadur, A. and Mohanty, O. N., "The Development of Fe-Al Intermetallics," *Journal of Materials Science*, No. 26, pp. 2685-2693, 1991.
8. Ryabov, V. R., "Structure and Phase Composition of the Aluminized Diffusion Layer", *Protective Coatings on Metals*, Edited by Academician G. V. Samsonov, Vol. 3, p. 96.
9. Belyak, L. F., and Coworkers, "Structure Transformation in Aluminum Coated and chromium-Coated Steel Kh25 N2052", *Metallurgical Science Heat Treating*, No. 3-4, pp. 217, 1978.
10. Knyazec, E. V., Voshedchenko, B. M., and Tsepin, A. I., "Structure and Phase Composition of a Diffusion Aluminized Coating", *Metallurgical Science Heat Treating*, No. 5-6, pp. 352, 1982.
11. Knyazev, E. V., Voshedchenko, B. M., and Voskresenskii, Yu. A., "Structure and Phase

Composition of on Aluminized Layer after Heat Treatment", *Metallurgical Science Heat Treating*, No. 1-2, pp. 117, 1983.

12. Bahadur, A., "Structure-Property Correlation in Al-Diffusion Coated Steels", *Journal of Materials Science*, No. 28, pp. 5375-5381, 1993.
13. Green, J. E., and Whelan, J. M., "GDOS for the Analysis of Thin Films", *Journal of Applied Physics*, Vol. 44, No. 6, pp. 2509-2513, 1973.

14. Al-Jaroudi, M. Y., Hentzell, H. T. G., and Gong, S., "The Influence of Titanium Nitride Rective Magnetron Sputtering on Hardened Tool Steel Surface", *Thin Solid Films*, No. 195, pp. 63-67, 1991.
15. Shewmon, P., *Diffusion in Solids*, 2nd Ed. TMS, pp. 10, 1989.
16. Bhattacharyya, S., "Wear and Friction in Steel, Aluminium and Magnesium Alloys", *Wear*, pp. 61, 131-141, 1980.