



# انجمن جوشکاری آزمایشهای غیرمخرب ایران

## دوازدهمین کنگراس ملی جوش و بازاری

اصفهان - ۷ و ۶ دی ماه ۱۳۹۰

### بهبود رفتار سایشی - فرسایشی تجهیزات Grit trap مورد استفاده در خطوط انتقال نفت و گاز توسط فرایند سطح نشانی سخت با استفاده از روش GTAW

محمد خیرالدین<sup>۱\*</sup>، حسین عربی<sup>۲</sup>، سعید رستگاری<sup>۲</sup>، محسن رحمن<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۴- رئیس بازرسی و حفاظت فنی شرکت نفت مناطق مرکزی ایران.

#### چکیده

یکی از مشکلات صنایع نفت و گاز در زمینه تعمیر و نگهداری تجهیزات و تاسیسات، بحث سایش و خوردگی سطوح داخلی مخازن و خطوط انتقال نفت و گاز می باشد. برای حل مشکل سایش از تجهیزاتی به نام Grit Trap برای جداسازی ذرات سخت از سیال استفاده می شود. اما سطوح داخلی این تجهیزات که از جنس فولاد کرنی (API-5L X52) است خود در معرض سایش توسط این ذرات سخت و نیز در معرض خوردگی توسط گاز ترش می باشد. در تحقیق حاضر به منظور بهبود رفتار فرسایشی این فولاد از ایجاد پوشش های سخت به روش جوشکاری GTAW بر روی این فولاد استفاده شد. مشخصات لایه های روکش کاری شده توسط میکروسکوپ الکترونی روموشی و آزمون میکروسختی سنجی بررسی شد. همچنین بر روی کلیه نمونه های پوشش داده شده و خام آزمون فرسایش (رفتگی در اثر برخورد ذرات ساینده) در دمای  $45 \pm C$  تحت زاویه  $90^\circ$  درجه انجام گرفت. نتایج نشان داد که در زاویه  $90^\circ$  درجه مقاومت به رفتگی نمونه های پوشش دار از نمونه خام بهتر بوده و بهترین مقاومت فرسایشی مربوط به پوشش پایه کبالت است که این موضوع به سختی بالاتر این پوشش ناشی از حضور مقادیر بالای کاربیدهای  $M_7C_3$  غنی از کروم در زمینه غنی از کبالت بازمی گردد.

واژه های کلیدی: فولاد API-5L-X52 - سوپر آلیاژ پایه کبالت - جوشکاری GTAW - ریزساختار - مقاومت به رفتگی

<sup>1</sup> Mohamad\_kheyrodin@yahoo.com

## مقدمه

یکی از مشکلات صنایع نفت و گاز در زمینه تعمیر و نگهداری تجهیزات و تاسیسات، بحث سایش و خوردگی سطوح داخلی مخازن و خطوط انتقال نفت و گاز می باشد [۱]. فلز به کار رفته در ساخت لوله بناچار فولاد ساده کربنی و یا کم آلیاژی (API-5L-X52) می باشد، زیرا به دلیل حجم انبوه مواد مورد نیاز برای خطوط انتقال نفت و گاز طبیعی و ملاحظات اقتصادی امکان استفاده از مواد آلیاژی میسر نمی باشد. اما در شرایط تریبولوژیک و خوردگی این فولادها مقاومت نسبتاً پایینی دارند [۱]. آمارها نشان می دهد که قسمت اعظم حوادث صنایع نفت و گاز به علت سایش رفتگی (فرسایش) و خوردگی صورت می گیرد. لذا ضروری است که تخریب رفتگی را که در نتیجه برخورد ذرات جامد بر روی سطح قطعه (معمولاً فلز) رخ می دهد در یابیم [۲ و ۱]. رفتگی به آسیب‌هایی اطلاق می گردد که در اثر برخورد گازها، مایعات، ذرات معلق در مایعات یا گازها، حباب‌های موجود در مایعات و قطرات معلق در گازها با سطح اجسام جامد به وجود می آید و منجر به کاهش وزن و حجم مواد جامد می شود. آسیب‌های مذکور یک نوع آسیب فیزیکی بوده که قادر است استفاده از قطعات را غیر ممکن سازد [۳].

در بسیاری از موارد به کارگیری آلیاژهای گران قیمت، مقاوم به فرسایش و خوردگی عمل چندان صحیحی نیست و عملاً از لحاظ اقتصادی، استفاده از مواد ساده تر به دلیل قیمت کمتر و قابلیت تغییر شکل آسان تر ارجحیت دارد. در این گونه موارد توصیه می شود که سطح قطعات با استفاده از پوشش‌های سطحی محافظت شود [۴]. کاربرد پوشش‌ها معمولاً به منظور اهداف گوناگونی از قبیل افزایش سختی، مقاومت سایش و مقاومت خوردگی می باشد [۵]. فرسایش سایشی، فرسایش چسبندگی و فرسایش فرتینگ معمولاً با استفاده از پوشش‌ها کاهش می یابند [۳]. پوشش‌های سخت موجب کاهش میزان سایش شده و به طور کلی قابلیت تحمل بارهای زیاد، سرعت زیاد و درجه حرارت‌های بالا به مدت طولانی را بدون آنکه از کیفیت آنها کاسته شود را دارند [۶].

استلایت و آلیاژهای Tribaloy، آلیاژهای پایه کبالت مقاوم به سایش هستند که استلایت ۶ متداول‌ترین آنها بوده و در گستره وسیعی از کاربردهای سطح نشانی کاربرد سخت دارد. از لحاظ میکروساختاری مقاومت به سایش آلیاژ استلایت ۶ به اثر بالای کاربیدهای  $M_7C_3$  در نواحی بین دندرتی هم در حالت جوشکاری شده و هم در حالت ریخته گری شده باز می گردد [۷]. این آلیاژ در برابر بسیاری از انواع خوردگی و سایش در رنج وسیع دمایی مقاومت بسیار خوبی دارد. این آلیاژ همچنین مقاومت خوبی در برابر seizing, galling و نیز رفتگی حباب زدگی دارد [۸]. تحقیقات Fernk و همکارانش [۹] نشان داد سختی و مقاومت سایشی پوشش‌های استلایت به ریزساختار پوشش وابسته می باشد. در این آلیاژها، کروم مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون را بهبود می بخشد و استحکام و سختی از طریق تشکیل کاربیدهای  $M_7C_3$  و  $M_{23}C_6$  افزایش می یابد. علاوه بر این عناصری مانند تنگستن و مولیبدن از طریق تشکیل کاربیدهای  $M_6C$  و  $MC$  و ترکیبات اینترمتالیک نظیر  $Co_3(Mo, W)$  باعث بهبود سختی و استحکام می شوند [۹ و ۱۰].

<sup>1</sup> Erosion

سوپر آلیاژهای پایه نیکل نیز می‌توانند در شرایط دمای بالا و در محیط‌های خوردنده مورد استفاده قرار گیرند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد ریزساختار این آلیاژ شامل کاربیدهای  $M_7C_3$  در محلول جامد غنی از نیکل است [۱۱]. تحقیقات Vite و همکارانش [۱۲] نشان می‌دهد سختی و مقاومت سایشی پوشش‌های پایه کبالت و پایه نیکل وابسته به کاربیدهای تشکیل شده در ساختار است. پوشش‌دهی با فلز پرکننده و پودر توسط جوشکاری یکی از روش‌های آلیاژ کردن سطح به منظور بهبود خواص فرسایشی می‌باشد. در تحقیق حاضر از فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز برای پوشش‌دهی فولاد کربنی (API-5L-X52) استفاده شد.

### روش تحقیق

#### مواد و روش پوشش‌دهی

در این تحقیق از لوله‌هایی از جنس فولاد کربنی API-5L-X52 که در خطوط انتقال نفت و گاز کاربرد دارد به عنوان فلز پایه و از استلایت ۶ (Stelloy 6G) و اینکونل ۶۲۵ (Gamma 625) جهت پوشش‌دهی بر روی فولاد مورد نظر استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلز پایه و روکش در جدول (۱) ارائه شده است.

عملیات پوشش‌دهی بر روی سطوح داخلی لوله‌هایی به شکل استوانه از جنس فولاد کربنی با قطر داخلی ۸ ضخامت ۵/ و ارتفاع ۶ اینچ انجام شد. قبل از پوشش‌دهی، سطوح داخلی لوله‌ها با استون شست‌وشو داده شد تا تمام آلودگی‌های سطحی برطرف شود و در ادامه نمونه‌ها داخل کوره تا دمای  $150^{\circ}C$  پیشگرم شدند. پوشش‌های استلایت ۶ و اینکونل ۶۲۵ بر روی فولاد کربنی توسط فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW) هر کدام در ۲ لایه با ضخامت ۶mm (ضخامت هر لایه ۳mm) اعمال شد. باید اشاره کرد که به منظور جلوگیری از افزایش دمای بیش از حد قطعه پس از هر ۴ پاس جوشکاری فرایند متوقف شده تا دمای قطعه از  $200^{\circ}C$  بالاتر نرود.

#### ارزیابی ریزساختار

پس از جوشکاری به منظور بررسی ریزساختاری، سطح پوشش‌ها ماشینکاری شد و در ادامه نمونه‌ها برش خورده و آماده سازی سطحی شدند. پس از آماده سازی و پولیش سطح و سطح مقطع نمونه‌ها، زیر لایه و پوشش توسط محلول‌های مندرج در جدول (۲) اچ شدند. تصاویری از سطح نمونه‌های پوشش دار و سطح مقطع نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری مدل Meiji techno-ML7100 و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Vega T-Scan تهیه شد.

#### سختی سنجی و آزمون رفتگی

سختی لایه‌های پوشش و زیر لایه توسط دستگاه سختی سنج ویکرز و پروفیل ریزسختی سطح مقطع نمونه‌های متالوگرافی شده با استفاده از یک دستگاه میکروسختی سنج ویکرز مدل MXT-al 9660a در بار ۵۰gr و زمان ۲۵ ثانیه محاسبه شد. به منظور بررسی رفتار فرسایشی زیر لایه و پوشش، آزمون رفتگی دوغابی در دوغابی شامل آب و ۱۳/۵٪ ماسه سیلیسی ( $SiO_2$ ) بر روی نمونه‌های خام و پوشش دار انجام شد. دستگاه آزمون رفتگی طبق استاندارد ASTM G73 و ASTM G119 در دانشگاه علم و صنعت ایران ساخته و مورد استفاده قرار گرفت. ماسه سیلیسی به عنوان عامل ایجاد رفتگی در این تحقیق، پس از شستشو خشک گردید و به مقدار ۱۳/۵٪ حجمی به سیال آزمایش اضافه شد. اندازه ذرات

$\text{SiO}_2$  بین  $0.2-0.3$  mm انتخاب شد. در شکل (۱) تصویری از ذرات  $\text{SiO}_2$  مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.

نمونه های خام (فولاد کربنی) و پوشش دار به منظور انجام آزمون رفتگی در ابعاد  $10$  mm طول،  $10$  mm عرض و  $17$  mm ارتفاع تهیه و سپس با پودر آلومینای  $4\mu\text{m}$  پولیش شده و پس از شستشو، در خشک کن خشک شده و با ترازوی الکتریکی با دقت  $0.1$  mg توزین شدند و به مدت ۱ ساعت تحت زاویه برخورد  $90^\circ$  درجه در معرض جت برخورد ذرات با سرعتی معادل  $11/5$  m/s قرار داده شدند. پس از آزمایش رفتگی نیز نمونه ها شستشو و با ترازوی دقیق الکترونی وزن شدند. سپس کاهش وزن نمونه های فرسایش یافته محاسبه و سطوح فرسایش یافته مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت.

### نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه های خام و پوشش دار در شکل ۲ نشان داده شده است.

در شکل (۲) الف و ب به ترتیب تصویر میکروسکوپ نوری فولاد کربنی در دو ناحیه دور از فصل مشترک و نزدیک فصل مشترک پوشش- زیرلایه آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود میکروساختار فولاد API-5L-X52 به طور غالب شامل فریت است که باندهای پرلیت نیز در ساختار حضور دارد.

در شکل (۲) ج و د به ترتیب تصویر میکروسکوپ نوری مربوط به پوشش های پایه کبالت و پایه نیکل در مقطع عرضی نشان داده شده است. همانطور که در تصویر نیز دیده می شود ریزساختار پوشش پایه کبالت شامل محلول جامد غنی از کبالت ( $\gamma$  با شبکه F.C.C) با ساختار دندردی است که کاربیدهای مقاوم به سایش و غنی از کروم در بین آن توزیع شده اند [۱۳]. این کاربیدها معمولاً  $\text{M}_7\text{C}_3$  (با شبکه اورتورومیک) و  $(\text{F.C.C}) \text{M}_{23}\text{C}_6$  می باشند [۱۴]. قابل ذکر است که این کاربیدهای کوچک به صورت اتفاقی در محلول جامد غنی از کبالت توزیع شده اند. مرحله اول انجماد در عبور از خط لیکوییدوس شامل انجماد محلول جامد کبالت است. در ادامه ترکیب شیمیایی مذاب واقع در فضای بین دندریت ها از کربن و کروم غنی تر شده و به ترکیب یوتکتیک نزدیک می شود. در مراحل پایانی انجماد و با نزدیک شدن به خط سالییدوس، کاربیدهای یوتکتیک منجمد می شوند [۱۵].

ریزساختار پوشش پایه نیکل نیز از محلول جامد غنی از نیکل و مقادیر کمی از کاربیدهای  $\text{M}_7\text{C}_3$  غنی از کروم تشکیل شده است. در مورد پوشش پایه نیکلی نیز محلول جامد غنی از نیکل به عنوان فاز اولیه در حین انجماد تشکیل شده و مذاب باقی مانده نهایتاً طی یک واکنش یوتکتیک به صورت کاربید منجمد می شود [۱۶]. در شکل (۳) میکروگراف های مقطع عرضی لایه های روکش شده بر روی فولاد کربنی آورده شده است. پوشش ها در دولایه که ضخامت هر لایه  $2-3$  mm است بر روی زیرلایه نشانده شده است. شکل (۳) الف بیانگر پیوند متالورژیکی مناسب پوشش استلایت ۶ با زیرلایه است، در حالی که در مورد نمونه روکش شده با اینکونل ۶۲۵ همانطور که در شکل دیده می شود در فصل مشترک پوشش با زیر لایه میکروترک هایی دیده می شود که این ترک ها در فواصل دور تر از فصل مشترک نیز اشاعه یافته اند. این ترک ها اگر چه در مقیاس میکرو هستند، اما چنانچه نمونه در معرض تنش و دماهای بالا قرار گیرد موجب می شود که پوشش از فصل مشترک دچار جدایش شود.

شکل (۴) پروفیل ریزسختی نمونه های پوشش داده شده با افزایش فاصله از سطح نمونه ها را نشان می دهد. بادقت در پروفیل های سختی اندازه گیری شده، دیده می شود که مقادیر ریزسختی نمونه های پوشش داده از سطح به سمت زیر لایه به تدریج کاهش می یابد و با رسیدن به فصل مشترک افت شدیدی در سختی رخ می دهد که بیانگر سختی به مراتب بالاتر پوشش ها نسبت به زیر لایه می باشد. همچنین مشاهده می شود که سختی پوشش پایه کبالت به مراتب بالاتر از پوشش پایه نیکل می باشد (۴۶۰ Hv در مقایسه با ۲۶۰ Hv) که این موضوع به علت حضور مقادیر زیاد از کاربیدهای  $M_7C_3$  در نواحی بین دندرتی باز می گردد. همچنین در تحقیقی که Hiduci و همکارانش [۱۷] انجام دادند به این نتیجه رسیدند که سختی بالاتر پوشش های پایه کبالت در مقایسه با پایه نیکل ناشی از مقادیر بالای کاربیدهای  $M_7C_3$  در ساختار می باشد. از آنجا که یکی از عوامل مهم در مقاومت به رفتگی مقدار سختی ماده می باشد لذا پیشینی می شود که مقاومت به رفتگی پوشش استلایت ۶ بالاتر از پوشش اینکونل ۶۲۵ باشد. در شکل (۵) نیز میانگین سختی لایه های مختلف که توسط آزمون سختی به دست آمده است گزارش شده است.

به دلیل وجود پدیده انحلال در فرایند جوشکاری TIG نفوذ عناصر از زیر لایه به پوشش و بالعکس را داریم و همین موضوع سبب می شود که در اثر نفوذ عناصر از زیر لایه به لایه اول ترکیب شیمیایی این لایه به خصوص در منطقه نزدیک به فصل مشترک متفاوت با ترکیب شیمیایی الکتروود پوشش باشد. این در حالی است که در لایه دوم میزان انحلال زیر لایه در پوشش نسبتاً جزئی بوده و ترکیب شیمیایی این لایه به ترکیب الکتروود پوشش نزدیک است و لذا مقدار سختی در لایه پایانی بالاتر و نزدیک تر به سختی استلایت ۶ و اینکونل ۶۲۵ است. این موضوع به خوبی در شکل های (۴) و (۵) نمایان است.

نتایج کاهش وزن به دست آمده از آزمون رفتگی برای نمونه های خام و روکش دار در جدول (۳) آورده شده است. به منظور شبیه سازی شرایط آزمون به آنچه در خطوط انتقال نفت و گاز رخ می دهد دمای آزمون ۴۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد و از آنجا که بیشترین میزان تخریب برای مواد ترد تحت زاویه ۹۰ درجه رخ می دهد، زاویه برخورد جت دوغاب به سطح نمونه ها نیز ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. اگرچه فولاد کربنی ماده ای است داکتیل و انتظار می رود بیشترین میزان تخریب در زوایای نزدیک به ۳۰ درجه رخ دهد اما به منظور یکسان سازی شرایط آزمون و مقایسه میزان تخریب در اثر فرسایش در این پژوهش زاویه برخورد ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است و بررسی سایر حالات در مقالات دیگر آورده شده است. همچنین به منظور کاهش خطا و قابل اعتماد بودن نتایج برای هر نمونه آزمون رفتگی ۳ بار انجام شد و نتایج در جدول گزارش شده است.

همانطور که مشاهده می شود نمونه خام که تحت عملیات پوشش دهی قرار نگرفته است کاهش وزن شدیدی را در مقایسه با نمونه های پوشش داده شده از خود نشان می دهد. همچنین می توان دید که نمونه روکش شده با استلایت ۶ نسبت به نمونه روکش شده با اینکونل ۶۲۵ کاهش وزن کمتری از خود نشان می دهد. این موضوع به علت حضور فازهای سختی چون  $Cr_7C_3$  و لذا سختی بالاتر پوشش پایه کبالت در مقایسه با پوشش پایه نیکل (حدود ۲ برابر) باز می گردد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که مقاومت به رفتگی نمونه روکش شده با استلایت ۶ بالاتر از نمونه روکش شده با اینکونل ۶۲۵ بوده و هر دو پوشش نیز مقاومت به رفتگی بالاتری نسبت به فولاد API-5L-X52 داشته و لذا می توانند در جاهایی که مقاومت به فرسایش حائز اهمیت است مورد استفاده قرار گیرند.

## نتیجه گیری

- ریزساختار پوشش پایه کبالت شامل محلول جامد غنی از کبالت ( $\gamma$  با شبکه F.C.C) با ساختار دندردیتی است که کاربیدهای مقاوم به سایش و غنی از کروم در بین آن توزیع شده اند. ریزساختار پوشش پایه نیکل نیز از محلول جامد غنی از نیکل و مقادیر کمی از کاربیدهای  $M_7C_3$  غنی از کروم تشکیل شده است.
- سختی و مقاومت به رفتگی بالاتر پوشش پایه کبالت ناشی از حضور مقادیر بالای کاربیدهای  $M_7C_3$  غنی از کروم در زمینه غنی از کبالت می باشد. پایین بودن سختی پوشش پایه نیکل نیز به مقدار کم کربن در پوشش نسبت داده شده است.
- مقاومت به رفتگی نمونه روکش شده با استلایت ۶ بالاتر از نمونه روکش شده با اینکونل ۶۲۵ بوده و هر دو پوشش نیز مقاومت به رفتگی بالاتری نسبت به فولاد API-5L-X52 داشته و لذا می توانند در جاهایی که مقاومت به فرسایش حائز اهمیت است مورد استفاده قرار گیرند.

## مراجع

- [۱]. م. باقر نژاد، "بررسی اثر گاز  $CO_2$  در محیط مرطوب بر روی خوردگی فولاد API 5L X70"، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۶.
- [2]. A.Gnanavelu, N. Kapur, A. Neville and J.F. Flores, " An integrated methodology for predicting material wear rates due to erosion". Wear, 267, 2009, 1935–1944.
- [۳]. ی.ح. خرازی، "تریبولوژی علم سایش و فرسایش"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران ۱۳۸۵
- [4]. Jyh-Wei Lee, Jenq-Gong Duh, Shu-Yueh Tsaib, "Corrosion resistance and microstructural evaluation of the chromized coating process in a dual phase Fe-Mn-Al-Cr alloy", Surface and Coatings Technology 153, 2002, 59–66.
- [۵]. ح. تویسرکانی، "اصول علم مواد"، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، چاپ چهارم، ۱۳۸۳.
- [6]. W. Gwidon. Stachowiak and W. Batchelor, "Engineering tribology", Butterworth Heinemann.
- [7]. W.C. Lin and C. Chen, "Characteristics of thin surface layers of cobalt-based alloys deposited by laser cladding", Surface & Coatings Technology 200, 2006, 4557–4563.
- [8]. Stellite6 : Deloro Stellite.
- [9]. A. Frenk and W. Kurz, "Microstructural effects on the sliding wear resistance of a cobalt-based alloy", Wear, 174, 1994, 81-91.
- [10]. W. C. Lin and C. Chen, "Characteristics of thin surface layers of cobalt-based alloys deposited by laser cladding", Surface & Coatings Technology, 200, 2006, 4557–4563.
- [11]. F. Jalilian, M. Jahazi and L. Drew, "Microstructural evolution during transient liquid phase bonding of Inconel 617 using Ni-Si-B filler metal", Materials Science and Engineering A, 423, 2006, 269–281.
- [12]. M. Vite, M. Castillo, L.H. Hernandez, G. Villa, I.H. Cruz, D. Stephane, "Dry and wet abrasive resistance of Inconel 600 and satellite", Wear, 258, 2005, 70–76.
- [13]. G. Xu, M. Kutsuna and K. Yamada, "Comparison between diode laser and TIG cladding of Co-based alloys on the SUS403 stainless steel", Surface and Coatings Technology, 201, 2006, 1138–1144.
- [14]. CS Ramachandran, VB Balasubramanian and RV Varahamoorthy, "Comparative evaluation of dry sliding wear Behavior of plasma transferred arc hardfaced Surfaces by the pin-on-roller method" J. Engineering Tribology, Vol. 224, 2009.
- [15]. F. Maiek, Ph. D. Thesis. Cranfield Institute of Technology. 1990.

[16]. Q.Y. Hou, Z.Y. Huang, N. Shi, J.S. Gao, "Effects of molybdenum on the microstructure and wear resistance of nickel-based hardfacing alloys investigated using Rietveld method", journal of materials processing technology, 209, 2009, 2767-2772.

[17]. A. Hidouci, J. M. Pelletier, F. Ducoin, D. Dezert, R. El Guerjouma, "Microstructural and mechanical characteristics of laser coatings", Surface and Coatings Technology, 123, 2000, 17-23.

جداول و شکل ها

جدول (۱) ترکیب شیمیایی سیم جوش استلایت ۶ و اینکونل ۶۲۵ (درصد وزنی)

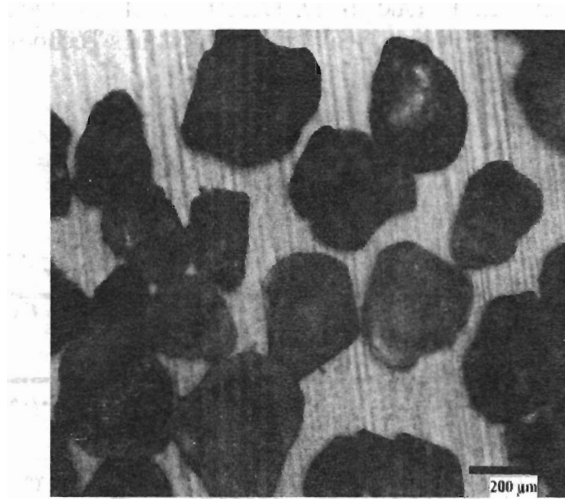
عنصر (wt%)	Cr	Co	Mo	W	Fe	Mn	C	Si	Ni	Nb
API-5L-X52	۰/۰۸۱	۰/۰۱۷	۰/۰۳۴	-	باقی	۰/۹۱۰	۰/۱	۰/۲۱	-	-
استلایت ۶	۲۹/۰	باقی	-	۴/۵	۴/۰	۱/۰	۱/۰۵	۱/۰	-	-
اینکونل ۶۲۵	۲۱	۱	۹	۱	۰/۴	۰/۴	۰/۰۲۵	۰/۳	باقی	۳/۴

جدول (۲) محلول اچ مورد استفاده در این تحقیق

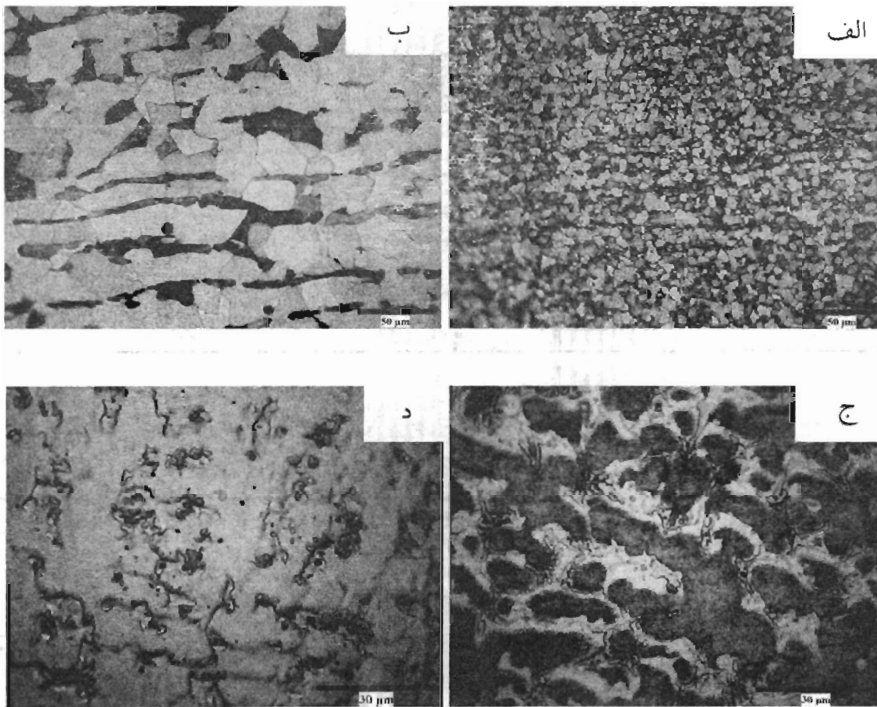
نمونه	محلول اچ
API-5L-X52	نایتال ۲٪
استلایت ۶	ماربل (۳۳٪) ۵۰ ml HCl، ۱۰ gr CuSO <sub>4</sub>
اینکونل ۶۲۵	۱۰ ml HNO <sub>3</sub> ، ۱۰ ml CH <sub>3</sub> COOH، ۱۵ ml HCl

جدول (۳) نتایج کاهش وزن آزمون رفتگی، دما ۴۵ درجه سانتیگراد و زاویه برخورد ۹۰ درجه.

نمونه	کاهش وزن (گرم) آزمون 1	کاهش وزن (گرم) آزمون 2	کاهش وزن (گرم) آزمون 3	میانگین
زیر لایه (API-5L-X52)	۰/۰۱۹	۰/۰۲۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۲
نمونه باروکش استلایت ۶	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۶۲
نمونه باروکش اینکونل ۶۲۵	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۸۴

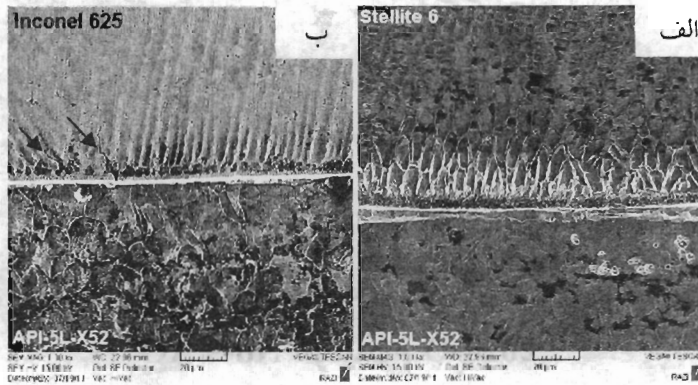


شکل (۱) تصویر ذرات  $\text{SiO}_2$  مورد استفاده در آزمایش رفتگی



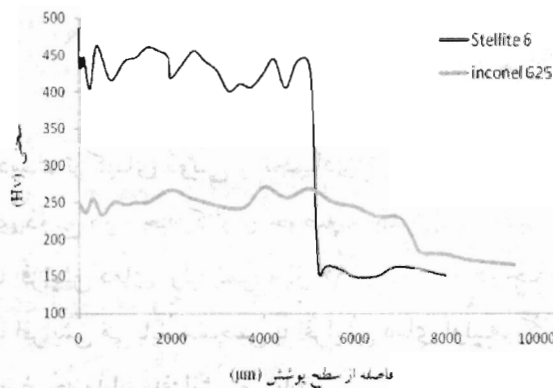
شکل (۲) تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه های خام و پوشش دار، (الف) نمونه خام نزدیک به فصل مشترک پوشش - زیر لایه، (ب) نمونه خام دور از فصل مشترک، (ج) پوشش استلایت ۶۶، (د) پوشش اینکونل ۶۲۵



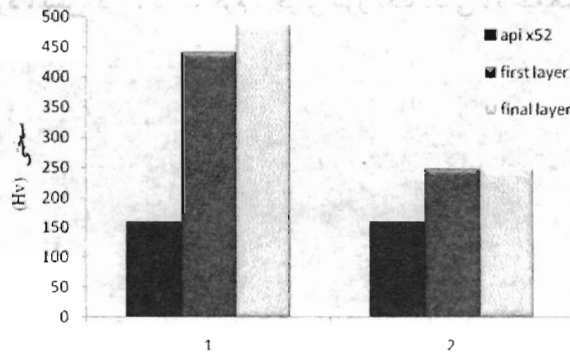


شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع نمونه های پوشش دار الف) مرز پوشش استلایت ۶ با زیر لایه و ب) مرز

پوشش اینکونل ۶۲۵ با زیر لایه



شکل (۴) پروفیل ریز سختی اندازه گیری شده روی سطح مقطع نمونه های پوشش داده شده



شکل (۵) سختی اندازه گیری شده لایه های مختلف: (۱) نمونه روکش شده با استلایت و (۲) نمونه روکش شده با

اینکونل ۶۲۵