

بررسی رفتار خوردگی داغ و اکسیداسیون پوشش‌های پره‌های توربین‌های گازی GE-F5، TG20 و MW701B

داور رضاخانی^۱ - مرتضی علی بابایی^۲ - محسن صارمی^۳ - مجتبی هیربد^۱ - محمد رضا خواجوی^۱
امیر پاشا^۱ - مریم فردوسی^۱ - سحر افروخته^۱
۱- پژوهشگاه نیرو، ۲- شرکت مدیریت تولید برق ری، ۳- دانشگاه تهران
تهران - ایران

واژه های کلیدی: توربین گازی - علل زوال - پره - پوشش - خوردگی داغ - اکسیداسیون

چکیده

در این مقاله آنالیز زوال پوشش‌های بکاررفته در پره های مستعمل ردیف اول متحرک توربین‌های گازی GE-F5، MW701B و TG20 نیروگاه ری مورد مطالعه قرار گرفت و مکانیزم‌های زوال تعیین گردید. سپس رفتار خوردگی داغ و اکسیداسیون پوشش‌های کروم آلومینایدی، پوشش‌های روکشی NiCoCrAlY و CoNiCrAlY که بطور گسترده بر روی این نوع از پره‌های توربین‌های گازی استفاده می گردند، مورد مطالعه قرار گرفت. بمنظور ارزیابی رفتار خوردگی داغ و اکسیداسیون پوشش‌ها، آزمایش‌های کوره ای بر روی نمونه‌های پره‌های مذکور در شرایط شبیه‌سازی شده انجام گرفت. نتایج نشان داد که پوشش‌های روکشی، مقاومت به خوردگی داغ و اکسیداسیون بالاتری در مقایسه با پوشش‌های کروم آلومینایدی دارا می باشند.

۱- مقدمه

در طی فرایند احتراق توربین‌های گازی، ناخالصی‌هایی چون سدیم، گوگرد، کلر و وانادیم که از طریق هوای ورودی یا سوخت وارد سیستم احتراق می شوند در فاز گازی ترکیباتی را تولید می کنند. اگر فشار بخار این ترکیبات بیشتر از نقطه شبنم آن در شرایط سرویس باشد در محیط احتراق روی قطعات سردتر بشکل مایع رسوب می کنند [۱]. در نتیجه فیلمی از نمک مذاب مثل سولفات سدیم، وانادات سدیم و یا کلرید سدیم روی پره ها ایجاد می‌شود. در نتیجه پره ها مورد تهاجم قرار گرفته، تخریب می‌شوند که نوع فرایند و مکانیزم آن بستگی به نوع رسوب، نوع آلیاژ و نوع محیط اکسیدکننده گازی دارد. به این فرایند زوال اصطلاحاً خوردگی داغ اطلاق می‌گردد [۲-۴].

دسته پوشش‌های مذکور نیز خود انواع بسیار زیادی از پوشش‌ها را شامل می‌شوند و هر نوع از این پوشش‌ها نیز توسط سازندگان مختلف تولید می‌گردند.

انواع پوشش‌های نفوذی شامل طیف گسترده‌ای از پوشش‌های کرومایدی، سیلیسایدی، آلومینایدی ساده، آلومینایدی اصلاح شده با کروم (کروم-آلومینایدی)، پوشش‌های آلومینایدی اصلاح شده با سیلیکون، آلومینایدی اصلاح شده با پلاتین و پوشش‌های پلاتین - آلومینایدی اصلاح شده با کروم می‌باشد. پوشش‌های آلومینایدی ساده مقاومت خوبی به اکسیداسیون دارند اما نسبت به خوردگی داغ بویژه خوردگی دمای پایین حساس می‌باشند. برخلاف این پوشش‌ها، پوشش‌های پلاتین - آلومینایدی علاوه بر مقاومت بالا در برابر اکسیداسیون نسبت به خوردگی داغ دمای بالا نیز از خود مقاومت بالایی نشان می‌دهند. ضمناً مقاومت به خوردگی داغ دمای پایین این پوشش‌ها بسیار بهتر از آلومینایدی‌های ساده می‌باشد. برای مقابله با خوردگی داغ دمای پایین از پوشش‌های کرومایدی استفاده می‌شود اما مشکلی که در رابطه با کاربرد این پوشش‌ها وجود دارد، محدودیت دمای کاربرد آنها تا حدود 800°C می‌باشد که بالاتر از این دما پوسته کرومیا (Cr_2O_3) تبخیر می‌گردد. بنابراین برای رسیدن به مقاومت بالا در برابر خوردگی داغ دمای پایین از پوشش‌های آلومینایدی اصلاح شده با کروم استفاده می‌شود. پوشش‌های کروم آلومینایدی مقاومت خوبی در برابر خوردگی داغ نوع یک نیز دارند. برای دستیابی به مقاومت بالا در برابر هر سه نوع مکانیزم زوال می‌توان از پوشش‌های پلاتین-آلومینایدی اصلاح شده با کروم استفاده نمود [۸]. پوشش‌های سیلیسایدی مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ بالایی از خود نشان می‌دهند. اما بدلیل داشتن نقطه ذوب پایین، ترد بودن کاربرد محدودی در توربین‌های گازی دارند [۸].

پوشش‌های روکشی MCrAlY به صورت پوشش‌های CoCrAlY ، NiCrAlY ، NiCoCrAlY و CoNiCrAlY ارائه می‌گردند. در پوشش‌های NiCrAlY عنصر نیکل منجر به افزایش مقاومت به اکسیداسیون این

خوردگی داغ بدو دسته خوردگی داغ نوع اول (دمای بالا) و خوردگی داغ نوع دوم (دمای پایین) تقسیم می‌گردند [۳].

خوردگی داغ نوع اول یک نوع اکسیداسیون سریع است که در دماهای بین $926-815^{\circ}\text{C}$ و در حضور سولفات سدیم اتفاق می‌افتد [۳]. از لحاظ میکروسکوپی این خوردگی با حمله مرزدانه‌ای، ذرات سولفید و ناحیه تهی شده در آلیاژ پایه شناخته می‌شود. با آنالیزی که توسط میکروپروب الکترونی انجام می‌شود می‌توان لایه ذرات مجزای سولفید کروم و تیتانیوم را در ناحیه تهی شده از این عناصر در زیر لایه پوسته‌های سطحی اکسیدی تشخیص داد (شکل ۱-الف) [۶].

خوردگی داغ نوع دوم در دماهای بین $760-593^{\circ}\text{C}$ عمدتاً اتفاق می‌افتد و نیاز به یک فشار جزئی قابل توجه از گاز SO_3 دارد [۷]. خوردگی داغ نوع دوم برخلاف نوع اول، منطقه تهی شده و حمله مرزدانه‌ای ندارد [۳] یا اینکه خیلی کم دارد

[۱]. همچنین ذرات سولفیدی زیر پوسته‌ای نیز مشاهده نمی‌شود. با آنالیزی که توسط میکروپروب الکترونی انجام می‌شود می‌توان لایه‌های زیر را تشخیص داد. سولفیدهای کروم و تیتانیوم یک لایه پیوسته تشکیل می‌دهد. پوسته سطحی فقط شامل اکسیدهای غیر محافظ نیکل و کبالت است (شکل ۱-ب) [۶].

در عمل ساختاری‌های میانی بین این دو نوع خوردگی نیز دیده می‌شوند که مشخصه‌هایی از هر دو نوع خوردگی را دارا بوده و به خوردگی داغ انتقالی مرسوم هستند [۷]. با آنالیزی که توسط میکروپروب الکترونی انجام می‌شود می‌توان لایه‌های زیر را در این خوردگی تشخیص داد. سولفیدهای کروم و تیتانیوم بطور فزاینده‌ای در شبکه‌های بزرگ سولفیدی متمرکز شده‌اند و پوسته‌های سطحی عمدتاً شامل اکسیدهای نیکل و کبالت می‌باشد (شکل ۱-ج) [۶].

شرایط مختلف عملیاتی توربین‌های گازی تقاضای زیادی را برای دسته‌های مختلف پوشش‌ها اعم از پوشش‌های نفوذی، روکشی و سد حرارتی ایجاد نموده که می‌توانند در برابر خوردگی داغ و اکسیداسیون مقاومت داشته باشند. هر کدام از

و مشخصات کلی پوشش‌های اعمالی را نشان می‌دهد. سپس بسته به مکانیزم زوال پره، نمونه‌های آزمایش تحت آزمایش خوردگی داغ و اکسیداسیون سیکلی قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از پیش گرم شدن تا دمای 200°C با محلول نمک فوق اشباع $10\% \text{NaCl}$ - $90\% \text{Na}_2\text{SO}_4$ به میزان حدود 2 mg/cm^2 پوشش داده شده و در درون کوره با درجه حرارت مشابه با دمای کاری پره مورد نظر قرار گرفتند. دمای کوره برای نمونه‌های GE-F5 و TG20، 800°C و برای نمونه‌های MW701B، 940°C انتخاب گردید. سپس بعد از طی یک سیکل زمانی به مدت ۳۰ ساعت، نمونه‌ها در کوره تا درجه حرارت محیط سرد شده، از کوره خارج گردیده و توزین شدند. سپس مجدداً نمک زده شده و در کوره قرار گرفتند. آزمایش در مدت زمان ۶ سیکل انجام پذیرفت. نمونه‌ها در ابتدا و انتهای هر سیکل با دقت 0.0001 g وزن می‌شد و از هر آزمایش دو بار تکرار گردید. نمونه‌ها بوسیله اندازه‌گیری تغییرات وزن نمونه در طول آزمایش، استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی، SEM/EDX و EPMA مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مکانیزم زوال پره متحرک ردیف اول GE-F5

تصویری که از مقطع نزدیک به نوک و لبه پره GE-F5 گرفته شده، نفوذ مرز دانه ای و رسوب ذرات بخوبی قابل مشاهده است (شکل ۲-الف). این مشخصه‌ها نشان دهنده وقوع خوردگی داغ نوع یک در این ناحیه می‌باشد. در تصویر دیگری که از مقطع نزدیک به سکوی پره و لبه قرار گرفته شده است، حمله مرز دانه ای و ذرات زیر سطحی مشاهده نمی‌شود که این مشاهدات نشان دهنده خوردگی داغ نوع دوم می‌باشد (شکل ۲-ب) [۳].

بررسی به کمک آنالیز نقطه ای وجود خوردگی انتقالی را در نواحی نزدیک به سکو و نوک پره تایید می‌کند (شکل ۳). آنالیز نقطه ای نیکل بگونه ای است که توزیع نیکل را فقط در لایه سطحی رسوب نشان می‌دهد و در زیر آن به استثنای منطقه آلیاژ پایه، فقط بصورت پراکنده حضور دارد.

خانواده از پوشش‌ها می‌گردد. در حالیکه در پوشش‌های CoCrAlY عنصر کبالت منجر به افزایش مقاومت به خوردگی داغ این خانواده از پوشش‌ها می‌شود [۹]. پوشش‌های NiCoCrAlY مانند پوشش‌های NiCrAlY مقاومت به اکسیداسیون بالایی دارند. علاوه بر آن به علت حضور درصد کمی از کبالت مقاومت به خوردگی داغ آنها نیز تا حد مطلوب افزایش می‌یابد. پوشش‌های CoNiCrAlY نیز خواصی مشابه خانواده گروه CoCrAlY ها دارند با این تفاوت که حضور نیکل مقاومت به اکسیداسیون و پایداری حرارتی پوشش را افزایش داده است [۹].

۲- روش تحقیق

نخست، جنس آلیاژ پره متحرک ردیف اول، جنس پوشش مورد استفاده، دمای کاری توربین و دمای گاز در سطح پره، ساعات کارکرد پره و عناصر آلاینده در هوای ورودی و سوخت مصرفی و حد مجاز آنها در توربین‌های گازی مورد نظر از نیروگاه گازی ری مشخص گردیدند. اطلاعات فوق در جدول ۱ نشان داده شده است. مطابق جدول مذکور میزان آلاینده‌ها در سوخت و هوای ورودی بالاست.

سپس سه عدد پره کارکرده ردیف اول متحرک از هر نوع توربین، انتخاب و از نقاط مختلف بریده، مانع وبا محلول گلیسر جیا اچ گردیدند. بعد به کمک میکروسکوپ نوری و الکترونی مورد ارزیابی قرار گرفتند و از آنالیز نقطه‌ای (Map X-Ray) و همچنین آنالیز عنصری رسوبات توسط EDX استفاده گردید.

در ادامه نمونه‌هایی به ابعاد $1.6 \times 1.6 \times 0.5 \text{ cm}$ از قسمت ریشه پره‌های مذکور تهیه شد. نمونه‌ها بعد از برش با پوشش‌های کروم آلومینیدی و پوشش‌های روکشی پوشش داده شدند. پوشش روکشی مورد استفاده برای نمونه‌های پره GE-F5، TG20، از نوع CoNiCrAlY و برای نمونه‌های پره MW701B، از نوع NiCoCrAlY بود. دلیل انتخاب این پوشش‌ها، مقاومت خوب این پوشش‌ها بسته به مکانیزم زوال پره‌های مورد نظر و استفاده آنها در پره‌های مذکور و توصیه شرکت‌های پوشش دهی بود. جدول ۲ ترکیب شیمیایی

۳-۳- مکانیزم زوال پره متحرک ردیف اول MW701B

شکل ۶ آنالیز نقطه ای عناصر کروم و آلومینیم را که از سطح پره MW701B بدست آمده است، نشان می‌دهد. مطابق شکل کروم در سطح نمونه‌ها متمرکز شده است و آلومینیم در زیر لایه سطحی غنی از کروم قرار دارد. با بررسی مورفولوژی محصولات خوردگی بدست آمده از سطح پره و مقایسه آنها با مورفولوژیهای ارائه شده در شکل ۱ و نیز آنالیزهای EDAX ارائه شده در شکل ۴-ج، خوردگی داغ نوع یک در این نوع از پره‌ها نیز، بوضوح قابل مشاهده می‌باشد. با بررسی نقاط مختلف پره و مورفولوژی محصولات خوردگی، خوردگی داغ نوع دوم در این نوع از پوششها مشاهده نگردید. البته بواسطه دمای بالای کاری این نوع از توربینها، پدیده اکسیداسیون نیز امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. با بررسیهای انجام شده از سطح پره، پوشش روکشی بر روی سطح پره اعمال شده بود که در اغلب مناطق این پوششها از بین رفته بودند.

۴- بررسی مورفولوژیکی نمونه‌ها قبل از آزمایش

شکل ۷ آنالیز خطی عناصر مختلف را در نمونه GE-F5 با پوشش کروم آلومینیدی قبل از انجام آزمایش خوردگی داغ نشان می‌دهد. مطابق شکل، عناصر نیکل و آلومینیم نسبت به کروم در سطح خارجی پوشش حضور بیشتری دارند. بر اساس نتایج بدست آمده توزیع عناصر مختلف در نمونه‌های TG20 و MW701B با پوشش کروم آلومینیدی مشابه شکل ۷ بود بدین معنا که در این دو نمونه نیز تجمع عناصر نیکل و آلومینیم بیشتر از عنصر کروم بودند. فاز NiAl ترکیبی است که میتواند در این منطقه وجود داشته باشد. به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نیز توزیع عناصر مختلف در نمونه GE-F5 با پوشش CoNiCrAlY و نمونه MW701B با پوشش NiCoCrAlY قبل از انجام آزمایش خوردگی داغ نشان داده شده است. توزیع عناصر در نمونه TG20 با پوشش CoNiCrAlY قبل از آزمایش مشابه نمونه GE-F5 با همان پوشش بود.

حال آنکه از زیر منطقه نیکل تا آلیاژ پایه تخلیه آلیاژی کروم بوضوح دیده می‌شود. گوگرد در ناحیه داخلی متمرکز شده است و بیشتر در مناطقی که نفوذ مرزدانه ای اتفاق افتاده است، دیده می‌شود.

آنالیز عنصری رسوب نشان دهنده بعضی عناصر مضر از جمله وانادیم و گوگرد می‌باشد (شکل ۴-الف). اثر وانادیم به این صورت است که ترکیبات این عنصر علاوه بر دارا بودن نقطه ذوب پایین بطور قابل توجهی حلالیت اکسید را وقتی با سولفات سدیم مخلوط می‌شوند، افزایش می‌دهند. در نتیجه سرعت خوردگی بسیار افزایش می‌یابد. بمنظور تعیین مکانیزم غالب نقاط مختلفی از سطح پره‌های مورد نظر مورد بررسی قرار گرفت و مکانیزم غالب زوال پره‌های مذکور خوردگی داغ نوع یک تشخیص داده شد. در روی پره اثری از پوشش مشاهده نگردید.

۳-۲- مکانیزم زوال پره متحرک ردیف اول TG20

شکل ۵ آنالیز نقطه ای عناصر کروم و آلومینیم را در نمونه پره TG20 نشان می‌دهد که فقیر شدن کروم در داخل نمونه و تجمع آن در سطح به خوبی قابل مشاهده است. از سوی دیگر با مشاهده آنالیز نقطه ای آلومینیم می‌توان دریافت که قسمت عمده آلومینیم در سطح و قسمتی زیر منطقه تخلیه شده کروم می‌باشد. با بررسی مورفولوژی محصولات خوردگی بدست آمده از سطح پره و مقایسه آنها با مورفولوژیهای ارائه شده در شکل ۱ و نیز آنالیزهای EDAX از نقاط مختلف پره (شکل ۴-ب)، خوردگی داغ نوع یک در این نوع از پره‌ها، بوضوح قابل مشاهده می‌باشد. البته در نواحی محدودی در نزدیکی ریشه، حفره‌های بطور پراکنده مشاهده شد که حضور خوردگی نوع دو را بطور محدودی بر روی پره‌های فوق نشان می‌داد ولی در مجموع خوردگی داغ نوع یک در پره‌های فوق حالت غالب داشت. با بررسیهای انجام شده بر روی سطح پره مورد نظر پوشش پایه آلومینیدی بر روی سطح پره اعمال شده بود که اغلب این پوششها مورد تهاجم خوردگی قرار گرفته بودند.

۵- بررسی مورفولوژیکی نمونه‌ها بعد از آزمایش

۵-۱- نمونه‌های پره متحرک ردیف اول GE-F5

شکل ۱۰ آنالیز خطی عناصر مختلف در نمونه GE-F5 با پوشش کروم آلومینایدی را بعد از انجام آزمایش خوردگی داغ نشان می‌دهند. مطابق شکل پوسته سطحی شامل کروم، نیکل و عمدتاً آلومینیوم می‌باشد. عنصر گوگرد در زیر لایه سطحی بیشتر است. تایج بررسی‌های متالوگرافیکی نشان داد که در بعضی نقاط پوشش از بین رفته و خوردگی در آلیاژ اتفاق افتاده است.

شکل ۱۱ نمونه GE-F5 با پوشش CoNiCrAlY را بعد از آزمایش خوردگی داغ و آنالیز کیفی مناطق نشان داده شده را نشان می‌دهند. مقدار دو عنصر کبالت و کروم در ناحیه B بیشتر از ناحیه A باشد. آنالیز کیفی ناحیه C، مقدار کروم را در این منطقه بیشتر از نواحی دیگر نشان می‌دهد. آنالیز کیفی در ناحیه A مقدار آلومینیوم را در این ناحیه نسبت به نواحی دیگر بسیار بیشتر نشان می‌دهد و چون هیچ عنصری در ناحیه پوسته به مقدار قابل توجه وجود ندارد، پوسته باید عمدتاً از جنس آلومینا باشد.

۵-۲- نمونه‌های پره متحرک ردیف اول TG20

بررسی مطالعات متالوگرافیکی روی نمونه‌های TG20 با پوشش کروم آلومینایدی بعد از آزمایش خوردگی داغ نشان داد که نمونه‌های مذکور در طول آزمایش خوردگی داغ متحمل خوردگی و تخریب و در بعضی مواقع دچار طبله شدن و پوسته زدن می‌شدند و در نقاط دیگر آثاری از رسوبات زیر سطحی مشاهده گردید. شکل ۱۲ توزیع عناصر مختلف در نمونه پوشش TG20 با پوشش کروم آلومینایدی را بعد از انجام آزمایش خوردگی داغ نشان می‌دهند. همانطور که در شکل دیده می‌شود در نقاطی نیکل بسیار زیاد است اما در نقاطی دیگر، میزان سولفور زیادی دیده می‌شود که این امر معرف یک فاز سولفیدی می‌باشد. برعکس در نقاطی که نیکل است سولفور دیده نمی‌شود که با توجه به اینکه دستگاه مورد استفاده قدرت تشخیص اکسیژن را نداشت، گمان بر اکسیدی

بودن این فاز می‌باشد. در سطح آلومینیم بیشتری دیده می‌شود و کروم بیشتر در مناطقی که گوگرد وجود دارد دیده می‌شود. نکته قابل ذکر در پوشش‌های CoNiCrAlY، سالم ماندن سطح و ظاهر پوشش بعد از انجام آزمایش می‌باشد به نحوی که نسبت به نمونه TG20 با پوشش کروم آلومینایدی سطح بهتر و مقاوم‌تر نسبت به خوردگی را نشان می‌دهد. در مورد این پوشش دیگر طبله کردن سطح وجود نداشت. با این وجود این پوشش نیز از حملات خوردگی در امان نمانده و دچار خوردگی، حملات سولفیدی زیر سطحی و همچنین حفره‌دار شدن گردیده بود. شکل ۱۳ توزیع عناصر مختلف را در نمونه TG20 با پوشش CoNiCrAlY بعد از انجام آزمایش خوردگی داغ نشان می‌دهد. مطابق شکل آلومینیم به سطح پوشش رفته و نکته جالب تھی نشدن کروم می‌باشد که با توجه به توضیحات قبلی علت این امر ناکافی بودن زمان برای تھی شدن کروم و همچنین مقاومت بیشتر این پوشش نسبت به خوردگی می‌باشد.

۵-۳- نمونه‌های پره متحرک ردیف اول MW701B

شکل ۱۴ توزیع برخی از عناصر را در بخشی از پوشش کروم آلومینایدی روی نمونه MW701B پس از اکسیداسیون نشان می‌دهد. مطابق شکل، یک لایه غنی از آلومینیم روی سطح تشکیل شده است. مطابق شکل مذکور لایه سطحی دارای میزان بالایی آلومینیوم بوده و میزان نیکل و کروم موجود در این لایه به مراتب کمتر از آلومینیوم می‌باشد. به عبارتی می‌توان گفت که در اینگونه پوشش‌های کروم-آلومینایدی لایه محافظ ایجاد شده در طی فرآیند اکسیداسیون، اکسید آلومینیوم می‌باشد. توزیع عنصری برخی از عناصر در پوشش NiCoCrAlY بر روی نمونه MW701B بعد از آزمایش اکسیداسیون در شکل ۱۵ نشان داده شده است. بر اساس بررسی‌های متالوگرافیکی مشخص گردید که این نوع از پوشش‌ها نیز در طول فرآیند اکسیداسیون سالم مانده اند. مطابق شکل ۱۵ در بخش خارجی پوشش لایه‌ای غنی از آلومینیم ایجاد شده که ادامه اکسیداسیون را متوقف نموده است و این بخش فاقد عناصر کروم، نیکل و کبالت می‌باشد. شکل ۱۶

۷- هزینه اعمال پوشش‌ها

پوشش انتخاب شده علاوه بر اینکه از نقطه نظر فنی باید قابلیت استفاده در شرایط بهره برداری توربین گازی مورد نظر را داشته باشد باید از نقطه نظر اقتصادی نیز مقرون بصره باشد. اگر چنانچه پوشش پره فاقد مقاومت کافی در برابر خوردگی داغ و اکسیداسیون در توربین مورد نظر باشد، عمر مورد نیاز را نخواهد داشت و سریعتر از بین خواهد رفت. از سوی دیگر چنانچه بجای پوشش بهینه، پوشش با مقاومت در برابر خوردگی داغ و اکسیداسیون بسیار بالا و قیمت بالا انتخاب شده باشد، در آن صورت نیز هزینه های اضافی بيمورد صرف شده، نوعی خسارت و اتلاف منابع تلقی می گردد. جدول ۳ محدوده قیمت هر یک از پوشش‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. در این جدول قیمت یک دست پره متحرک ردیف اول توربین‌های گازی مورد نظر نیز جهت مقایسه آمده است. با بررسی جدول مذکور و مقایسه قیمت یک ست پره و قیمت پوشش آن میتوان گفت که پوشش‌های روکشی با توجه به قیمت بالا تنها برای پره هایی که قیمت بالایی دارند مناسب خواهد بود از اینرو پوشش‌های روکشی برای پره‌های GE-F5 توصیه نمی‌شوند در حالیکه برای پره‌های MW701B و TG20 بسیار مناسب می باشند.

۸- نتیجه گیری

- مکانیزم غالب زوال در پره های متحرک ردیف اول توربین‌های گازی GE-F5 و TG20، خوردگی داغ نوع اول شناسایی گردید. خوردگی داغ نوع اول و اکسیداسیون، مکانیزم غالب زوال در پره های متحرک ردیف اول توربین‌های گازی MW701B تشخیص داده شد.

- در نمونه‌های مربوط به GE-F5 و TG20، پوشش روکشی CoNiCrAlY نسبت به پوشش کروم آلومینیدی مقاومت به خوردگی داغ نوع یک بالاتری دارد. در نمونه های مربوط به MW701B نیز پوشش

تصویر میکروسکوپی و توزیع عناصر را در نمونه MW701B با پوشش کروم آلومینیدی بعد از آزمایش خوردگی داغ نشان می‌دهد. مطابق شکل، پوشش کروم آلومینیدی از بین رفته و آلیاژ زمینه در معرض خوردگی قرار گرفته است. مطابق شکل، محصولات خوردگی به داخل سوپراآلیاژ نفوذ کرده و در نتیجه خوردگی شدیدی صورت پذیرفته است. توزیع عنصر نیکل بگونه ای است که یک لایه غیر یکنواخت از نیکل روی سطح نمونه تشکیل شده است. این لایه که به احتمال زیاد اکسید نیکل می‌باشد، لایه محافظی محسوب نمی‌شود. لایه پیوسته‌ای از کروم روی سطح نمونه مشاهده می‌شود که به احتمال زیاد این فاز اکسید کروم می‌باشد. می‌توان بیان نمود که کروم از پوشش به لایه خوردگی مهاجرت کرده است. زیر لایه غنی از کروم، لایه پیوسته غنی از آلومینیم می‌باشد و عنصر گوگرد در بعضی نقاط بصورت متمرکز دیده می‌شود. شکل ۱۷ توزیع عنصری عناصر مختلف را در نمونه با پوشش NiCoCrAlY بعد از آزمایش خوردگی نشان می‌دهند. مطابق شکل، عنصر نیکل در لایه سطحی وجود ندارد و عنصر کروم در این لایه بسیار ناچیز می باشد. توزیع عنصری آلومینیم نشان می دهد که ترکیب آلومینیم دار، ترکیب اصلی در لایه سطحی مورد نظر می باشد که به صورت یک لایه محافظ تمام پوشش را در بر گرفته است و همچنین همان‌طور که در شکل دیده می‌شود زمینه پوشش دارای میزان کمتری از این عنصر می‌باشد. این امر بیانگر این مطلب است که عنصر آلومینیم از زمینه پوشش به لایه سطحی مهاجرت کرده است. عنصر گوگرد نیز در بعضی نقاط نزدیک سطح خارجی نمونه متمرکز شده است.

۹- بررسی تغییرات وزن نمونه‌ها بعد از آزمایش

شکل ۱۸ تغییرات وزنی نمونه های GE-F5، TG20 و MW701B با پوشش کروم آلومینیدی و پوشش روکشی را در طول فرایند خوردگی داغ یا اکسیداسیون نشان می‌دهند. مطابق شکل‌های مذکور خوردگی در نمونه‌های پوشش دار روکشی کمتر از نمونه های پوشش داده شده با کروم آلومینیدی در هر سه نوع GE-F5، TG20 و MW701B می باشد.

- [8] S.Jordan and M..J.Fraser, “ Gas Turbine Rotating Blade Life Improvement “, turbine blading group Ltd , Malaysia , 1992.
- [9] M. Malik et al. , “ The Corrosion Resistance of Protective Coatings”, High Temperature Alloys For Gas Turbines , Reidel Publishing Co. 1982.

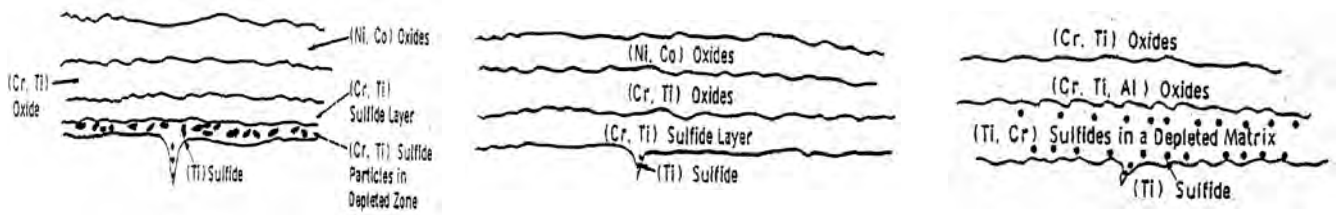
NiCoCrA1Y کارائی بهتری را در مقایسه با پوشش کروم آلومینایدی از خود نشان داد.

- برای پره های TG20 و MW701B به ترتیب پوشش‌های NiCoCrA1Y و CoNiCrA1Y بسیار توصیه می‌شوند حال آنکه برای پره های GE-F5 پوشش‌های CoNiCrA1Y توصیه نمی‌گردند.

۹- مراجع

- [1] John Stringer, “Coatings in the Electricity Supply Industry: Past Present and Opportunities” , Surface and Coatings Technology, 1998,108-109, P.1.
- [2] Roland Streiff, “Alumindes: Yesterday’s and Tomorrow ‘s Coatings for Materials in Aggressive Environments”, Edited by N.B. Dahotre etal., Elevated Temperature Coatings: Science and Technology II, 1996, P.407.
- [3] P.W. Schille, ”Advanced Gas Turbines Materials and Coatings”, GER – 3569F
- [4] N. Eliaz , G. Shemesh, R.M. Latanision, “ Hot Corrosion in Gas Turbine Components“, Engineering Failure Analysis, 2002, Vol.9, P.31.
- [5] M.A. DeCrescente and N.S. Bornstein, Corrosion, 1968, Vol. 23,p.116.
- [6] R. Viswanathan, “ An Investigation of Blade Failures in Combustion Turbines”, Engineering Failure Analysis, 2001,Vol.9, p.493
- [7] S.R.J. Saunders, M.K. Hossain, J.M. Ferguson, “ Comparison of Hot – Salt Corrosion Test Procedures”, Proceedings of High Temperature Alloys for Gas Turbins Conference, Belgium, 1982, p.167

۱۰ - اشکال

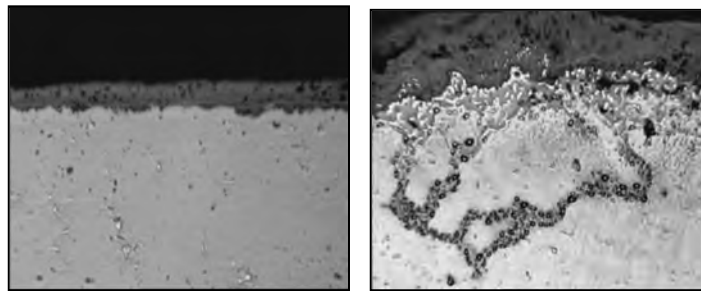


ج) خوردگی داغ انتقالی

ب) خوردگی داغ نوع دوم

الف) خوردگی داغ نوع اول

شکل ۱- مورفولوژی انواع خوردگی داغ

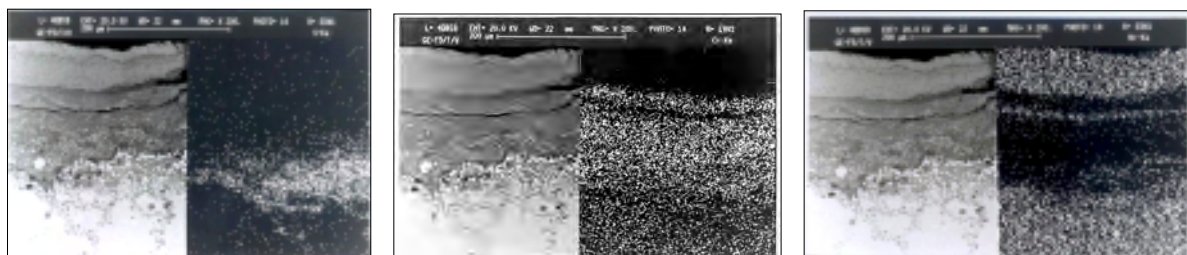


ب

الف

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی از پره GE-F5

الف) مقطع نزدیک به نوک و لبه پره (×۲۵۰) ، ب) مقطع نزدیک به سکوی پره و لبه قرار (×۱۵۰)

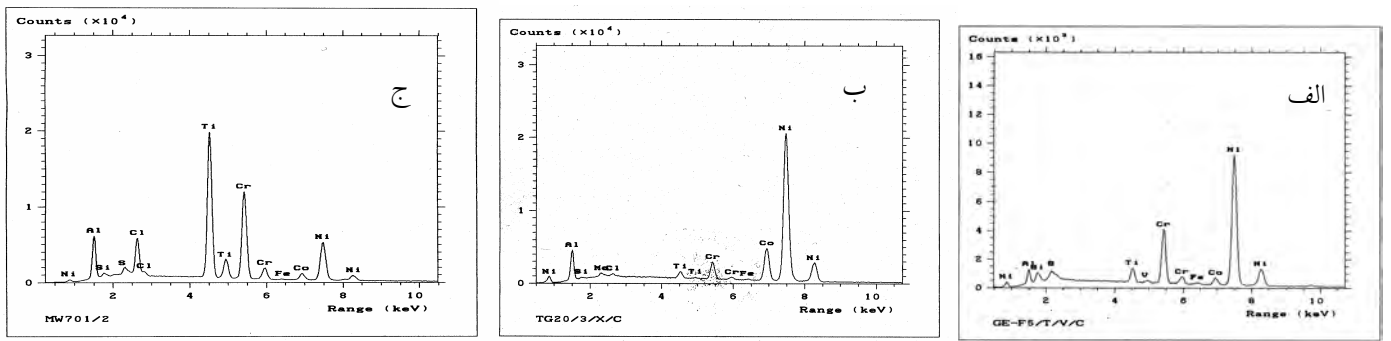


الف) عنصر نیکل

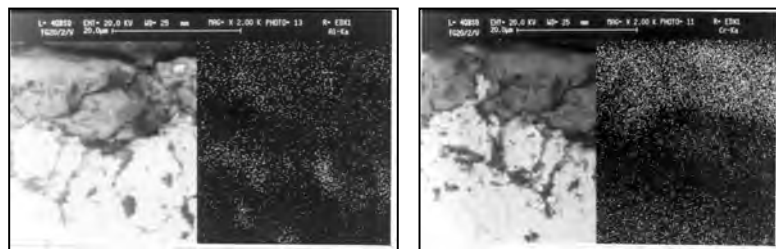
ب) عنصر کروم

ج) عنصر وانادیوم

شکل ۳- آنالیز نقطه‌ای عناصر در نمونه بریده شده از پره GE-F5



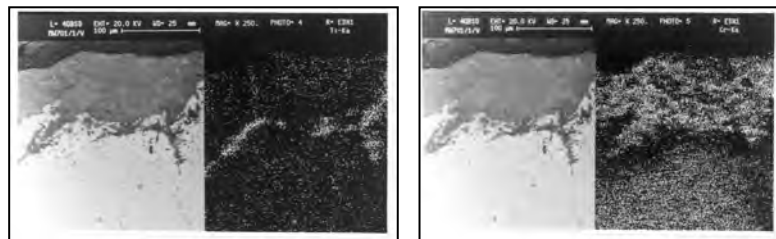
شکل ۴- آنالیز کیفی رسوب از موقعیت نزدیک به نوک در الف) پره GE-F5، ب) پره TG20، ج) پره MW701B



ب) عنصر آلومینیم

الف) عنصر کروم

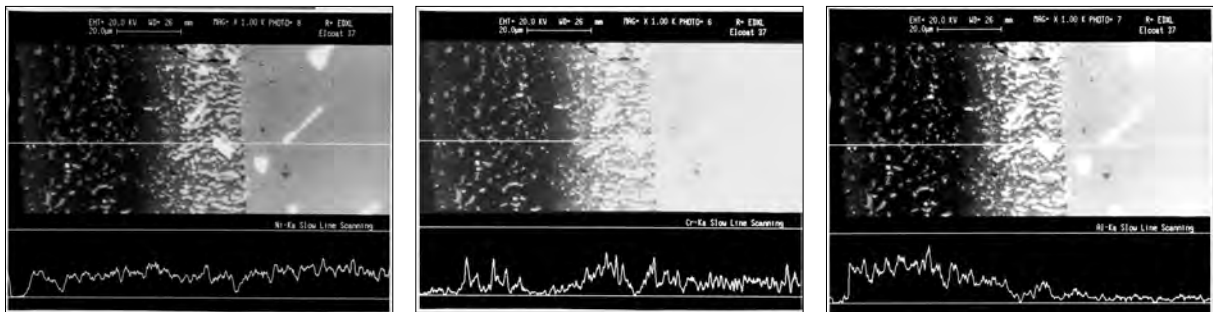
شکل ۵- آنالیز نقطه‌ای عناصر در نمونه بریده شده از پره TG20



ب) عنصر آلومینیم

الف) عنصر کروم

شکل ۶- آنالیز نقطه‌ای عناصر در نمونه بریده شده از پره MW701B

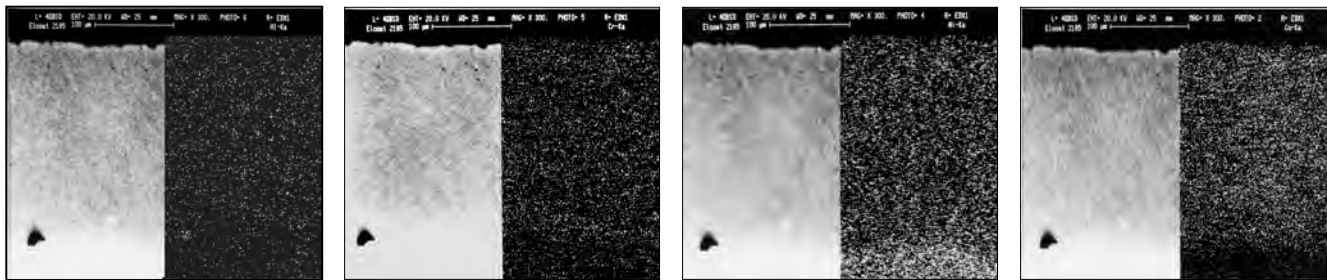


ج) عنصر آلومینوم

ب) عنصر کروم

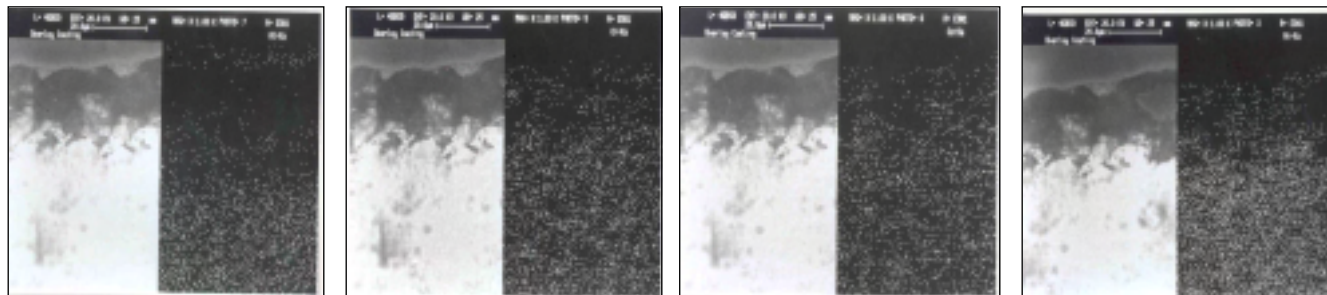
الف) عنصر نیکل

شکل ۷- آنالیز خطی عناصر مختلف در نمونه GE-F5 با پوشش کروم آلومینایدی قبل از آزمایش خوردگی داغ



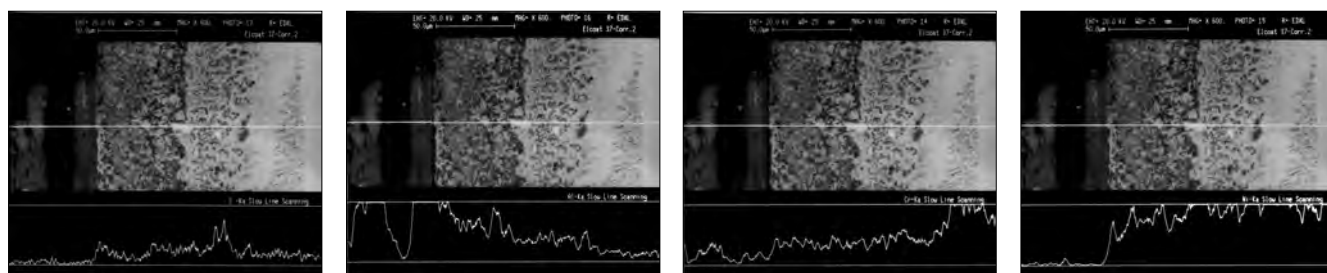
الف) عنصر نیکل (ب) عنصر کروم (ج) عنصر کبالت (د) عنصر آلومینیوم

شکل ۸- توزیع عناصر مختلف در نمونه GE-F5 با پوشش CoNiCrAlY قبل از آزمایش خوردگی داغ



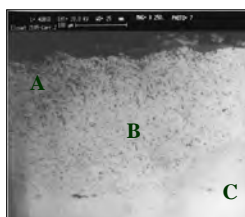
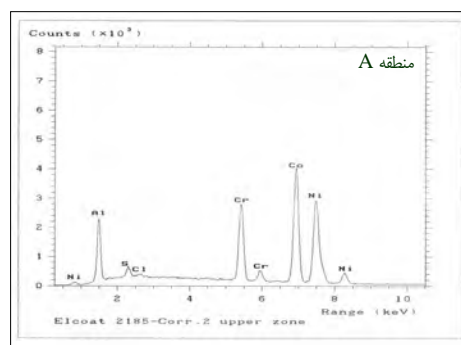
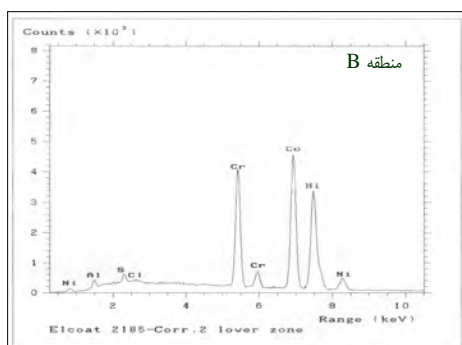
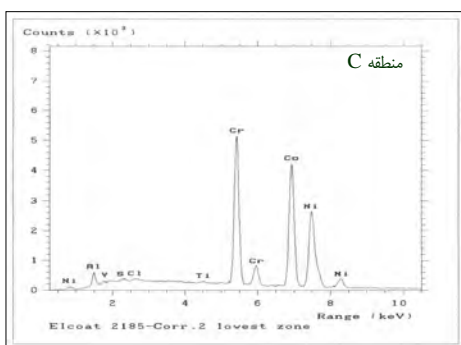
الف) عنصر نیکل (ب) عنصر کروم (ج) عنصر کبالت (د) عنصر آلومینیوم

شکل ۹- توزیع عناصر مختلف در نمونه MW701B با پوشش NiCoCrAlY قبل از آزمایش خوردگی داغ



الف) عنصر نیکل (ب) عنصر کروم (ج) عنصر آلومینیوم (د) عنصر گوگرد

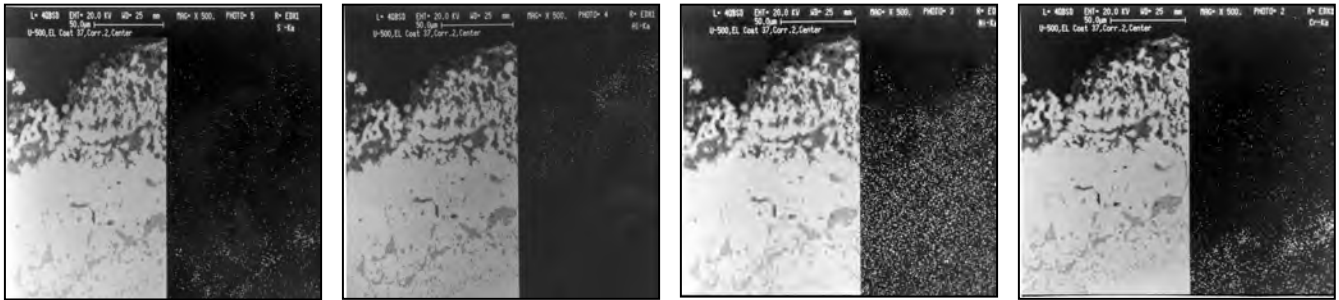
شکل ۱۰- آنالیز خطی عناصر مختلف در نمونه GE-F5 با پوشش کروم آلومینایدی بعد از آزمایش خوردگی داغ (۸۰۰-۱۸۰۰°C) ۱۸۰ ساعت



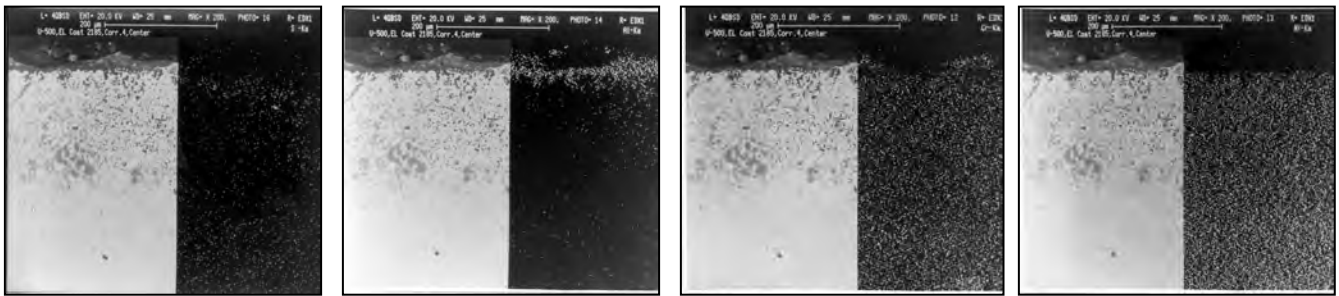
شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپی و آنالیز کیفی نمونه GE-F5 با پوشش CoNiCrAlY بعد از آزمایش خوردگی داغ در نقاط نشان داده شده (۸۰۰-۱۸۰۰°C) ۱۸۰ ساعت

بررسی رفتار خوردگی داغ و اکسیداسیون پوشش‌های پره‌های توربین‌های گازی GE-F5 ، TG20 و MW701B

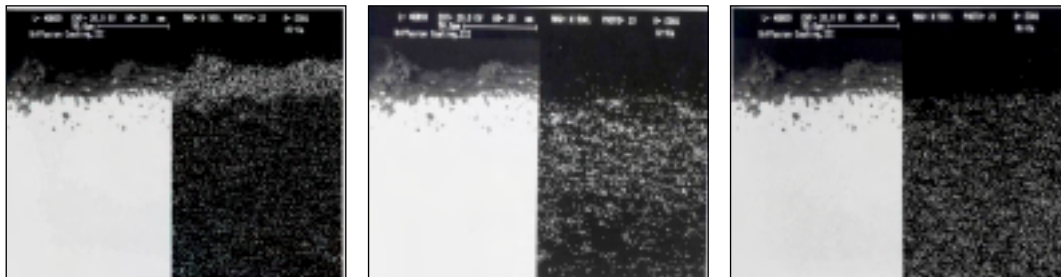
نوزدهمین کنفرانس بین المللی برق - تهران - ۱۳۸۳



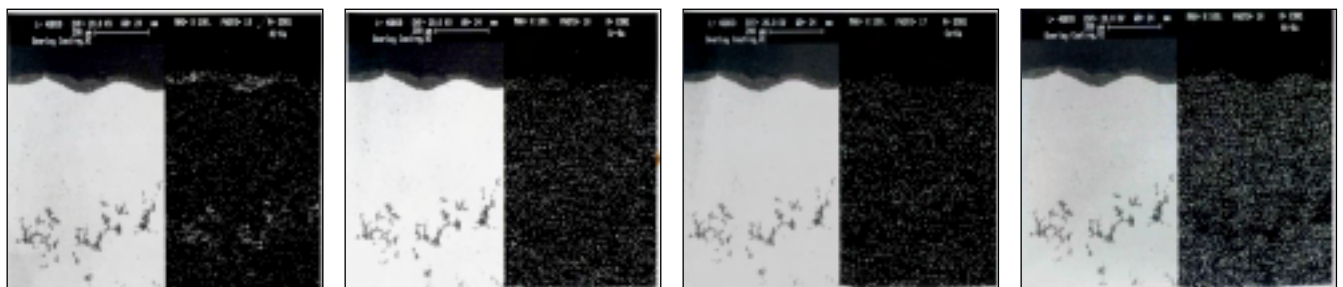
شکل ۱۲- توزیع عناصر مختلف را در نمونه TG20 با پوشش کروم آلومینایدی بعد از آزمایش خوردگی داغ (۸۰۰-۱۸۰ ساعت) (الف) عنصر نیکل (ب) عنصر کروم (ج) عنصر آلومینیم (د) عنصر گوگرد



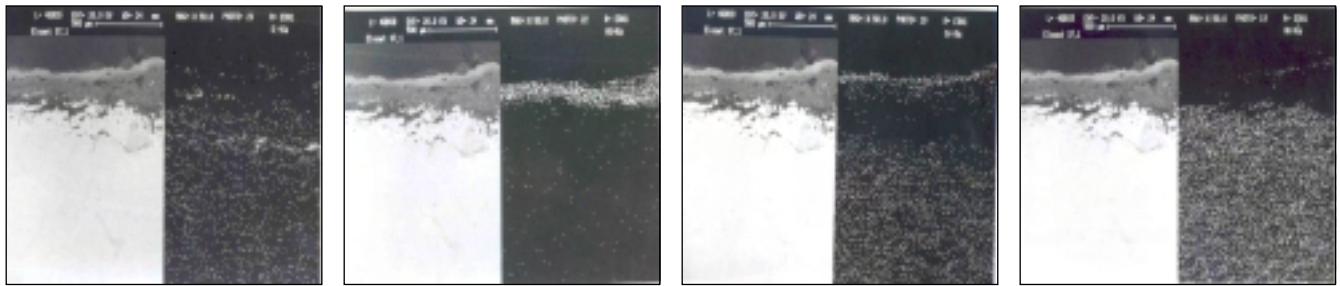
شکل ۱۳- توزیع عناصر مختلف را در نمونه TG20 با پوشش CoNiCrAlY بعد از آزمایش خوردگی داغ (۸۰۰-۱۸۰ ساعت) (الف) عنصر نیکل (ب) عنصر کروم (ج) عنصر آلومینیم (د) عنصر گوگرد



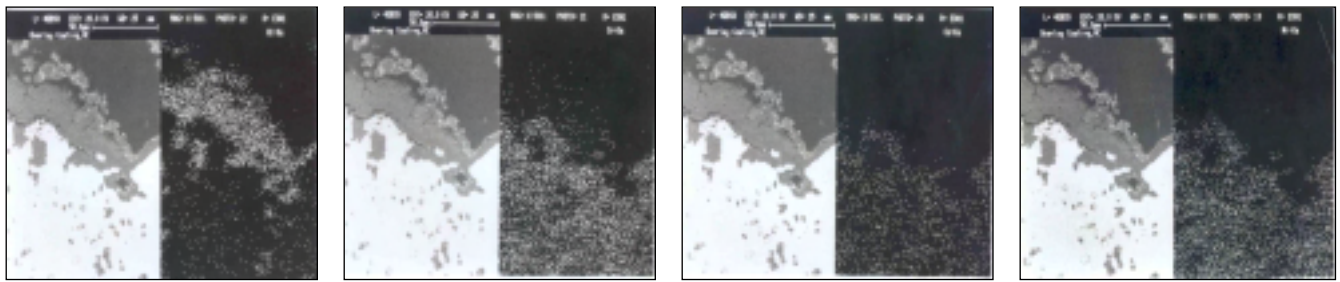
شکل ۱۴- توزیع عناصر مختلف را در نمونه MW701B با پوشش کروم آلومینایدی بعد از آزمایش اکسیداسیون (۹۴۰-۱۸۰ ساعت) (الف) عنصر نیکل (ب) عنصر کروم (ج) عنصر آلومینیم



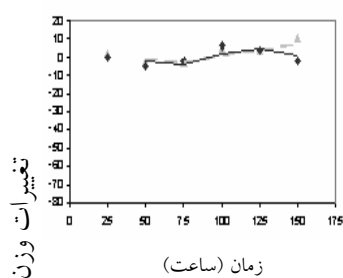
شکل ۱۵- توزیع عناصر مختلف را در نمونه MW701B با پوشش NiCoCrAlY بعد از آزمایش اکسیداسیون (۹۴۰-۱۸۰ ساعت) (الف) عنصر نیکل (ب) عنصر کبالت (ج) عنصر کروم (د) عنصر آلومینیم



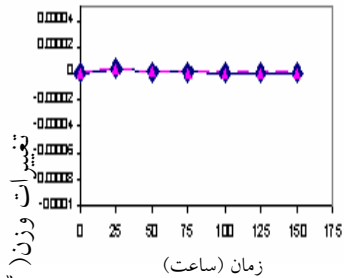
شکل ۱۶- توزیع عناصر مختلف را در نمونه MW701B با پوشش کروم آلومینایدی بعد از آزمایش خوردگی داغ (°C ۹۴۰-۱۸۰ ساعت)



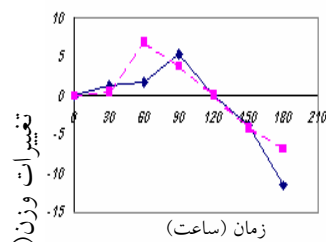
شکل ۱۷- توزیع عناصر مختلف را در نمونه MW701B با پوشش NiCoCrAlY بعد از آزمایش خوردگی داغ (°C ۹۴۰-۱۸۰ ساعت)



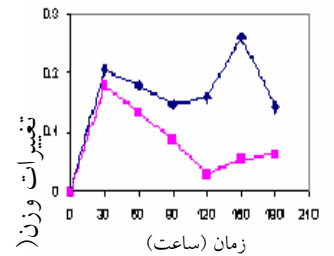
نمونه: MW701B
پوشش: کروم آلومینایدی
آزمایش: خوردگی داغ



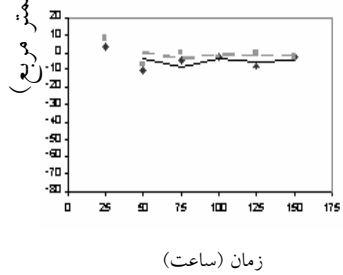
نمونه: MW701B
پوشش: کروم آلومینایدی
آزمایش: اکسیداسیون



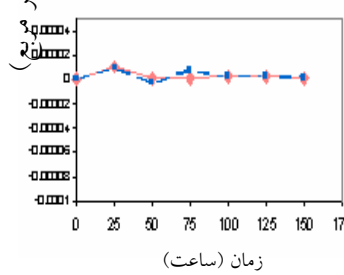
نمونه: TG20
پوشش: کروم آلومینایدی
آزمایش: خوردگی داغ



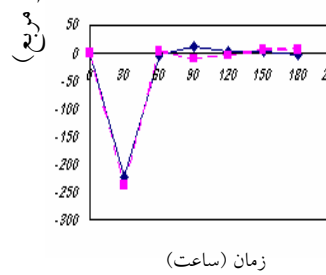
نمونه: GE-F5
پوشش: کروم آلومینایدی
آزمایش: خوردگی داغ



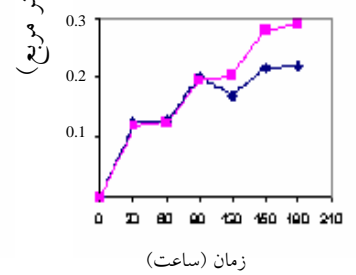
نمونه: MW701B
پوشش: روکشی
آزمایش: خوردگی داغ



نمونه: MW701B
پوشش: روکشی
آزمایش: اکسیداسیون



نمونه: TG20
پوشش: روکشی
آزمایش: خوردگی داغ



نمونه: GE-F5
پوشش: روکشی
آزمایش: خوردگی داغ

شکل ۱۸- تغییرات وزنی نمونه‌ها بعد از آزمایش خوردگی داغ یا اکسیداسیون با دو بار تکرار هر آزمایش

۱۱- جداول

جدول ۱- مشخصات توربین‌های گازی GE-F5 ، TG20 و MW701B

مشخصات	توربین GE-F5	توربین TG20	توربین MW701B
جنس آلیاژ پره ردیف اول متحرک طبق مشخصات سازنده	IN738LC	U-500	U-520
ترکیب شیمیایی آلیاژ پره ردیف اول متحرک	۰/۹Nb-۱/۷۵Mo-۲/۶W -۰/۰۱B-۱/۷۵Ta ۰/۰۵Zr -۳/۴Al-۳/۴Ti-۰/۱۱C Ni بقیه ۱۶Cr/۵Co	۲Fe-۰/۰۱B-۰/۷۵Mn-۵Mo -۳/۲۵Al-۳/۲۵Ti-۰/۱C Ni بقیه ۲۰Cr۲۰Co	-۱/۲W-۶/۵Mo ۰/۰۰۸B -۲/۲Al-۳/۲Ti-۰/۰۵C Ni بقیه ۲۰Cr۱۳Co
جنس پوشش طبق مشخصات سازنده	پوشش نفوذی	پوشش ۳۶Co۳۴Ni۲۱/۵Cr۸AlY	پوشش‌های روکشی
ساعات کارکرد	۲۴۳۶۵	۳۱۵۷۸	۲۹۷۳۷
دمای پره (°C)	۸۰۰	۸۰۰	۹۳۷
دمای گاز در سطح پره (°C)	۹۵۴	۹۳۴	۱۰۲۰
آنالیز سوخت	سدیم: ۴/۲۹ ، پتاسیم: ۰/۴۹۵ ، گوگرد: ۰/۹۴۸	سدیم: ۴/۲۹ ، پتاسیم: ۰/۴۹۵ ، گوگرد: ۰/۹۴۸	سدیم: ۴/۲۹ ، پتاسیم: ۰/۴۹۵ ، گوگرد: ۰/۹۴۸
حد مجاز عناصر آلاینده در سوخت (ppm)	سدیم + پتاسیم: ۱ وانادیم ممانعت نشده: ۱ وانادیم ممانعت شده: ۱۰۰-۵۰۰ سرب: ۱ ، کلسیم: ۱۰ گوگرد: ۱٪	سدیم + پتاسیم: ۰/۵ وانادیم ممانعت نشده: ۰/۵ وانادیم ممانعت شده: ۱۰۰ سرب: ۲ ، کلسیم: ۱۰ گوگرد: ۲٪	سدیم + پتاسیم: ۰/۵ وانادیم ممانعت نشده: ۰/۵ وانادیم ممانعت شده: ۱۰۰ سرب: ۲ ، کلسیم: ۱۰ گوگرد: ۲٪
آنالیز هوا (μg/m3)	سدیم: ۰/۵۷۵ ، پتاسیم: ۰/۲۳۰ کلسیم: ۲۸/۷۲۸	سدیم: ۰/۵۷۵ ، پتاسیم: ۰/۲۳۰ کلسیم: ۲۸/۷۲۸	سدیم: ۰/۵۷۵ ، پتاسیم: ۰/۲۳۰ کلسیم: ۲۸/۷۲۸
حد مجاز عناصر آلاینده در هوا (ppm)	سدیم + پتاسیم + وانادیم ۰/۰۰۵ >	-----	-----

جدول ۲- مشخصات کلی پوشش‌های اعمال شده بر روی نمونه‌های بریده شده از پره‌های مورد نظر جهت آزمایش

نوع پوشش	ترکیب کلی پوشش (درصد وزنی)	محدوده ضخامت پوشش (میکرون)	روش پوشش دهی
پوشش کروم آلومینایدی	(در منطقه خارجی پوشش) ۲۸-۳۵٪ کروم ، ۷-۹٪ آلومینیم	۱۰۰-۱۱۰	سمانتاسیون پودری
پوشش روکشی	۳۲٪ نیکل - ۲۱٪ کروم - ۸٪ آلومینیم - ۷٪ یتریم	۲۰۰-۳۰۰	پلازما اسپری تحت خلاء

جدول ۳- قیمت پوشش‌ها، قیمت یک ست پره ردیف اول متحرک توربین‌های گازی مورد نظر

نوع توربین گازی			نوع هزینه‌ها
توربین گازی MW701B (هر ست پره ۱۰۳ عدد)	توربین گازی TG20 (هر ست پره ۸۰ عدد)	توربین گازی GEF5 (هر ست پره ۱۲۰ عدد)	
پوشش NiCoCrA1Y ۳۴۰۰۰ - ۳۷۰۰۰	پوشش CoNiCrA1Y ۱۲۰۰۰ - ۱۴۰۰۰	پوشش CoNiCrA1Y ۲۰۰۰۰ - ۲۴۰۰۰	محدوده قیمت پوشش‌ها برای یک ست پره (واحد یورو)
پوشش کروم - آلومینایدی ۷۵۰۰ - ۷۸۰۰	پوشش کروم - آلومینایدی ۷۰۰۰ - ۷۵۰۰	پوشش کروم - آلومینایدی ۷۵۰۰ - ۷۷۰۰	هزینه یک ست پره (واحد یورو)
۴۵۰۰۰۰	۲۴۰۰۰۰	۷۰۰۰۰	