



اعمال پوشش سد حرارتی مرکب (FGM) حاصل از تغییر تدریجی ترکیب

شیمیایی روی سوپر آلیاژ پایه نیکل و بررسی رفتار خوردگی داغ آن

امیرحسین پاک سرشت^۱، امیرحسین جوادی^۲، محمد رضا جهان نما^۳

^۱. پژوهشگاه مواد و انرژی (دکتری)

^۲. پژوهشکده مهندسی، تهران، ایران (دانشجوی دکتری)

^۳. پژوهشکده مهندسی، تهران، ایران (دکتری)

چکیده

پوشش دهی مواد می تواند سبب افزایش طول عمر و کارایی مواد علی الخصوص در دماهای بالا باشد. پوشش های سد حرارتی از جمله این موارد است که بر روی فلزات اعمال می شوند. این پوشش ها معمولاً شامل زیرکونیای پایدار شده با اکسید ایتیریم هستند. این ماده به دلیل دانسیته پایین، انتقال حرارت کم و مقاومت به شوک حرارتی خوب عایق حرارتی مناسبی برای زیر لایه محسوب شده و از آن به منظور حفاظت حرارتی قطعات بحرانی که در دمای بالا مانند موتورهای هواپیما قرار دارند استفاده می شود. در این تحقیق بمنظور افزایش خاصیت مقاومت به خوردگی داغ پوشش های سد حرارتی و کاهش تنش پسماند بین لایه سرامیکی با لایه فلزی به ترتیب از یک لایه فوقانی الومینای و یک لایه واسط فلزی -سرامیکی استفاده گردید. نتایج نشان داد که مقاومت به خوردگی داغ این پوشش از پوشش های متداول سد حرارتی به مراتب بیشتر است.

واژه های کلیدی: پوشش سد حرارتی، پوشش چند لایه، خوردگی داغ.

عنوان مقاله تصحیح شود. تصحیح شد.

جمله اول بهتر نوشته شود. (حذف گردید)

¹. Ebrahimi@email.com

مقدمه

استفاده از سرامیک ها بدلیل خواص منحصر بفردی چون پایداری حرارتی و شیمیایی بالا و رفتارهای مکانیکی و الکتریکی متفاوت که در محیط های مختلف از خود نشان می دهند امروزه توجه گسترده ای را برای کاربردهای مختلف به خود اختصاص داده اند. ساخت قطعات حجیم سرامیکی با توجه به کاربردی که برای آن تعریف شده است ممکن است مقرون به صرفه نباشد لذا امروزه استفاده از پوشش های سرامیکی روی مواد مختلف زیر لایه در برابر محیط هایی مثل محیط های خورنده و ساینده مطرح شده است. به گونه های که این پوشش ها در بسیاری از موارد جایگزین فلزات و قطعات گران قیمت با خواص ویژه شده است.

پوشش های سد حرارتی نسبتاً ضخیم (۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر) و از جنس مواد سرامیکی و مقاوم به حرارت می باشند که از زیر لایه فلزی در برابر دماهای بسیار زیاد محافظت میکنند. در داغ ترین مناطق موتور توربین های گازی، امکان استفاده از این پوشش ها در محیط های گاز با دماهای بالاتر از نصف دمای ذوب شان فراهم است [۱]. پوشش های سد حرارتی با روش هایی ایجاد می شوند که توانایی اعمال انرژی کافی برای ذوب یا تبخیر ماده اولیه را داشته باشند. از جمله روش هایی که توانایی تولید این انرژی بالا را دارند می توان پوشش پلاسمای در اتمسفر هوا (APS) رسوب فیزیکی از فاز بخار به کمک پرتوی الکترونی (EB-PVD) اشاره کرد [۲-۴]. معمولاً برای از بین بردن عدم انطباق حرارتی بین پوشش سرامیکی و زیر لایه فلزی از پوشش های چند گانه یا پوشش استفاده می شود در مقایسه با پوشش های دو لایه یا معمولی در این گونه از پوششها معمولاً از یک یا چند لایه میانی که مخلوطی از پوشش سرامیکی و پوشش Bond است استفاد می شود [۴-۸]. خوردگی داغ که مهمترین عامل تخریب پوشش های سد حرارتی است نوعی اکسیداسیون تسریع شده در اثر وجود رسوبات می باشد. این رسوبات می تواند ناشی از تجمع نمک هایی مانند V_2O_5 ، Na_2SO_4 و $NaCl$ باشد این نمک ها می توانند با یکدیگر ترکیب شده و تشکیل رسوب مذاب دهند. در این تحقیق با اعمال لایه آلومینایی روی لایه فوقانی متداول خواص مقاومت به خوردگی داغ پوشش بررسی شد.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش برای ایجاد پوشش ها از دستگاه پاشش پلاسمای در اتمسفر هوا با تفنگ Metco3MB استفاده می شود. به منظور ثابت نگه داشتن نمونه ها در طول لایه نشانی از یک نوع فیکسچر خاص استفاده خواهد شد. همچنین از گاز آرگون (Ar) به عنوان گاز اولیه پلاسمای و گاز حامل پودر و از هیدروژن (H_2) به عنوان گاز ثانویه استفاده خواهد شد. پارامترهای پاشش پلاسمای براساس داده هایی که توسط شرکت های تولید کننده پودرها (سولزر متکو) تدوین شده تنظیم می شوند. پارامترها پوشش دهی عمدتاً براساس نقطه ذوب و اندازه دانه های پودرها و همچنین متناسب با درصد تخلخل مطلوب، انتخاب می شوند. زیرلایه از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل انتخاب گردید.

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

از پودر NiCrAlY با کد تجاری Metco 442 جهت ایجاد پوشش فلزی میانی استفاده شد. شکل ۱ نیز تصویر میکروسکوپ الکترونی از مورفولوژی پودر را نشان می‌دهد که همانطور که مشاهده می‌شود پودرها دارای مورفولوژی کروی می‌باشند.

به منظور ایجاد پوشش سرامیکی از پودر زیر کونیا پایدار شده با ایتریا با کد تجاری 204NS استفاده گردید. شکل ۲ نیز تصویر میکروسکوپی الکترونی پودر YSZ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ذرات دارای مورفولوژی کروی بوده و توزیع تقریباً یکسانی از نظر اندازه دارند.

به منظور ایجاد لایه رویی در پوشش کامپوزیت لایه‌ای (YSZ/micro Al_2O_3) از پودر آلومینای میکرون با خلوص بالا و کد تجاری Metco 105 NS استفاده گردید. شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی از پودر را نشان می‌دهد. مورفولوژی پودر غیر کروی بوده و فقط دارای فاز α است که مناسبترین فاز آلومینا برای پاشش پلاسما می‌باشد.

نتایج و بحث

شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع پوشش TBC-FGM با لایه فوقانی آلومینا را نشان می‌دهد. حضور یک لایه میانی کامپوزیتی $60\% \text{YSZ} + 40\% \text{NiCrAlY}$ و یک لایه بالایی از جنس الومینا به صورت لایه‌ای متخلخل، از ویژگی پوشش‌های ایجاد شده به روش پاشش پلاسما می‌باشد. وجود ذرات و پودرهای سرامیک که به دلیل دمای ذوب بالا کمتر تغییر شکل داده اند در بین لایه‌های کاملاً تغییر شکل یافته NiCrAlY کاملاً مشخص است که نشان از ایجاد یک لایه ترکیبی کاملاً مطلوب می‌باشد.

بمنظور مشاهده بهتر توزیع عناصر تشکیل دهنده لایه‌ها تصویر ۵ تصویر نقشه ساختاری از سطح مقطع پوشش‌های چند لایه با سطح فوقانی آلومینا را نشان می‌دهد. وجود ۵ لایه مجزا در این تصاویر بخوبی مشخص است.

شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی پس از آزمون خوردگی داغ را با اشکالهای الکترونی برگشتی و ثانویه از سطح پوشش FGM-TBC با لایه فوقانی میکرو آلومینا را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود احتمال وجود سه فاز در این تصویر بخوبی مشخص است برای بررسی این فازها آنالیز EDX بر روی نقاط B، A و C گرفته شد که نتایج آنها در تصاویر ۷ تا ۹ و جداول ۱ تا ۳ آورده شده است. با توجه به نتایج نقطه A مربوط به فاز غنی از ایتریم و وانادیم است که از زیر کونیم تخلیه شده است. نقطه B مربوط به آلومینا و نقطه C مربوط به نقاط کوچک زیر کونیا است.

مکانیزم‌های تخریب ناشی از خوردگی داغ در پوشش‌های سد حرارتی، تحت شرایط سرویس می‌تواند متعدد باشد. رسوبات ممکن است هم روی زیر کونیا و هم روی پوشش میانی فلزی اثر بگذارد و این اثر ممکن است شیمیایی یا مکانیکی باشد. نمک مذاب از طریق تخلخل‌ها و ترک‌های موجود در پوشش زیر کونیا می‌تواند به لایه میانی فلزی برسد و با آن واکنش دهد. تشکیل زیر کونیا منو کلینیک و افزایش سرعت تف‌جوشی زیر کونیا در حضور اکسیدهای بوجود آمده ناشی از واکنش شیمیایی رسوبات با فازهای پایدار کننده منجر به

.....

تخریب پوشش های سد حرارتی بر پایه زیر کونیا می شود. به طور اساسی تشکیل زیر کونیا ی مونو کلینیک و افزایش سرعت تف جوشی باعث افزایش تجمع تنش ها در لایه زیر کونیا یی می شود. تغییر فاز زیر کونیا ی تترا گونال شبه پایدار¹ (t') به فاز مونو کلینیک افزایش حجمی حدود ۴ درصد را به همراه دارد که می تواند منجر به تخریب پوشش یکپارچه زیر کونیا یی شود. تف جوشی باعث اثرات منفی روی خواص مکانیکی پوشش به دلیل افزایش مدول یانگ می شود، همچنین نفوذ رسوبات مذاب به داخل ریز ساختار متخلخل زیر کونیا باعث به وجود آمدن تنش های اضافی به دلیل عدم انطباق انبساط حرارتی بین رسوبات و زیر کونیا می شود. یا اعمال پوشش آلومینا می توان از نفوذ بیشتر تمک های ذوب شده بر روی پوشش زیر کونیا جلوگیری کرد که این موضوع باعث افزایش مقاومت به اکسیداسیون می گردد.

نتیجه گیری

در نمونه های TBC کامپوزیت لایه ای، وجود یک لایه متراکم روی پوشش YSZ، نفوذ اکسیژن و نمک های مذاب به داخل ساختار TBC را کاهش داده و باعث بهبود خوردگی داغ در مقایسه با پوشش های متداول شد. در آزمون خوردگی داغ، واکنش نمک های مذاب با پایدار کننده زیر کونیا، باعث تخریب پوشش ها می شود.

¹ . Metastable Tetragonal

مراجع

- 1- Li. Chang-Jiu, Li. Jing-Long," Evaporated-gas-induced splashing model for splat formation during plasma spraying", Surface and Coatings Technology, vol. 184,pp. 13–23,2004.
- 2- A. W. Batchelor, L. N. Lam, M. Chandrasekaran, " Materials degradation and its control by surface engineering", 2nd Edition, Imperial College Press, London 2003.
- 3-A. Samuli, " Modified thick thermal barrier coating ," Ph.D. Dissertation , Institute of Materials Science, Tampere University of Technology,2004.
- 4-K.A. Khor," Microstructure formation in plasma-sprayed functionally graded NiCoCrAlY/yttria-stabilized zirconia coatings", Surface and Coatings Technology,Vol. 114 pp.181–186,1999.
- 5-K.A. Khor ,Z.L. Dong, Y.W. Gu," Plasma sprayed functionally graded thermal barrier coatings", Materials Letters ,Vol. 38 Pp. 437–444, 1999.
- 6-K.A. KhorU, Y.W. Gu," Thermal properties of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings", Thin Solid Films, Vol. 372. Pp.,104-113,2000.
- 7-Demirkiran AS, Avci E. "Evaluation of functionally gradient coatings produced by plasma-spray technique". Surf Coatings Technol; Vol. 116, pp. 292 –295, 1999.
- 8-Demirkiran AS, C, elik E, Avci E."Evaluation of functionally gradient materials after thermal shock". Proceedings of the Fifth International Fracture Conference, vol.10. September 2001:1341–1344.

جدول ۱: نتیجه آنالیز عنصری از نقطه A در شکل ۶

Spectra: MICRO-A

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Oxygen	K series	6.13	5.51	22.68
Vanadium	K series	30.62	27.50	35.58
Yttrium	L series	52.91	47.51	35.22
Gold	M series	21.70	19.49	6.52
Total:		111.4 %		

جدول ۲: نتیجه آنالیز عنصری از نقطه B در شکل ۶

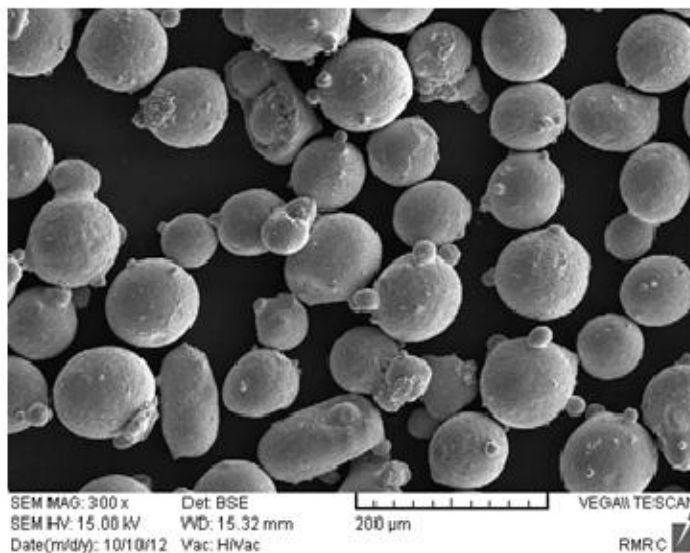
Spectra: MICRO-B

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Oxygen	K series	44.81	48.23	63.96
Aluminium	K series	41.72	44.90	35.30
Gold	M series	6.39	6.87	0.74
Total:		92.9 %		

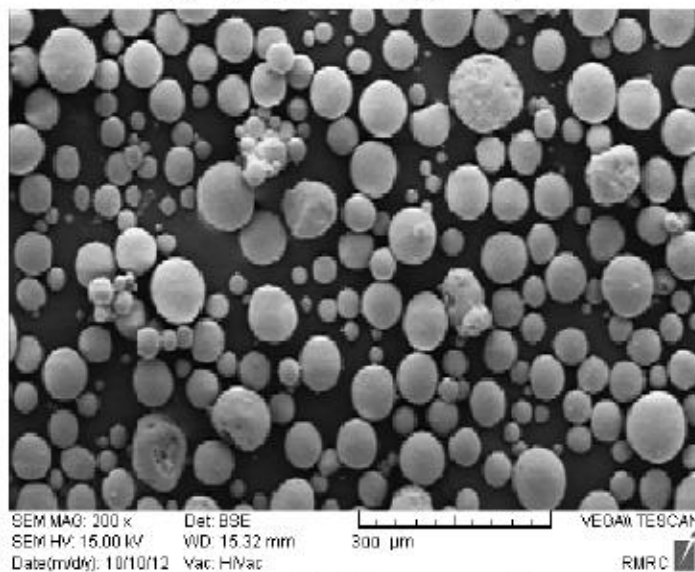
جدول ۳: آنالیز عنصری از نقطه C در شکل ۶

Spectra: MICRO-C

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Oxygen	K series	14.52	12.56	42.55
Aluminium	K series	10.13	8.77	17.61
Yttrium	L series	4.59	3.97	2.42
Zirconium	L series	61.12	52.88	31.42
Gold	M series	25.21	21.81	6.00
Total:		115.6 %		

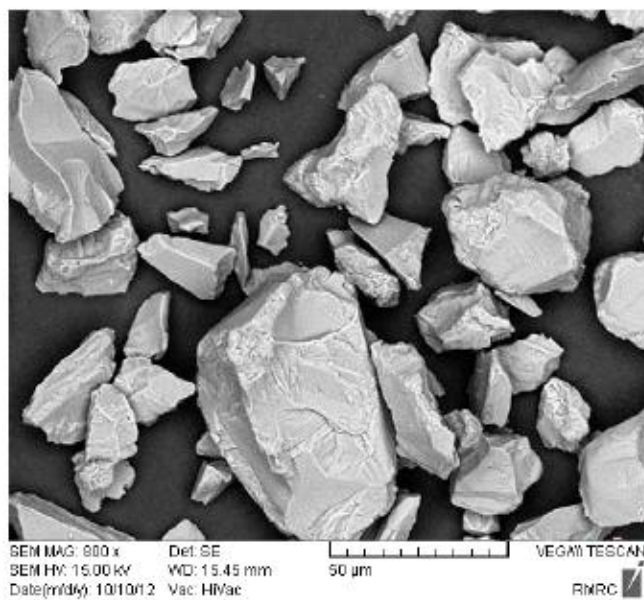


شکل ۱: تصویر SEM پودر لایه میانی



شکل ۲: تصویر SEM پودر YSZ

اعمال پوشش چند لایه نانو ساختار با لایه سرامیکی



شکل ۳: تصویر SEM پودر آلومینا

Nanc-A 2C 3

TBC

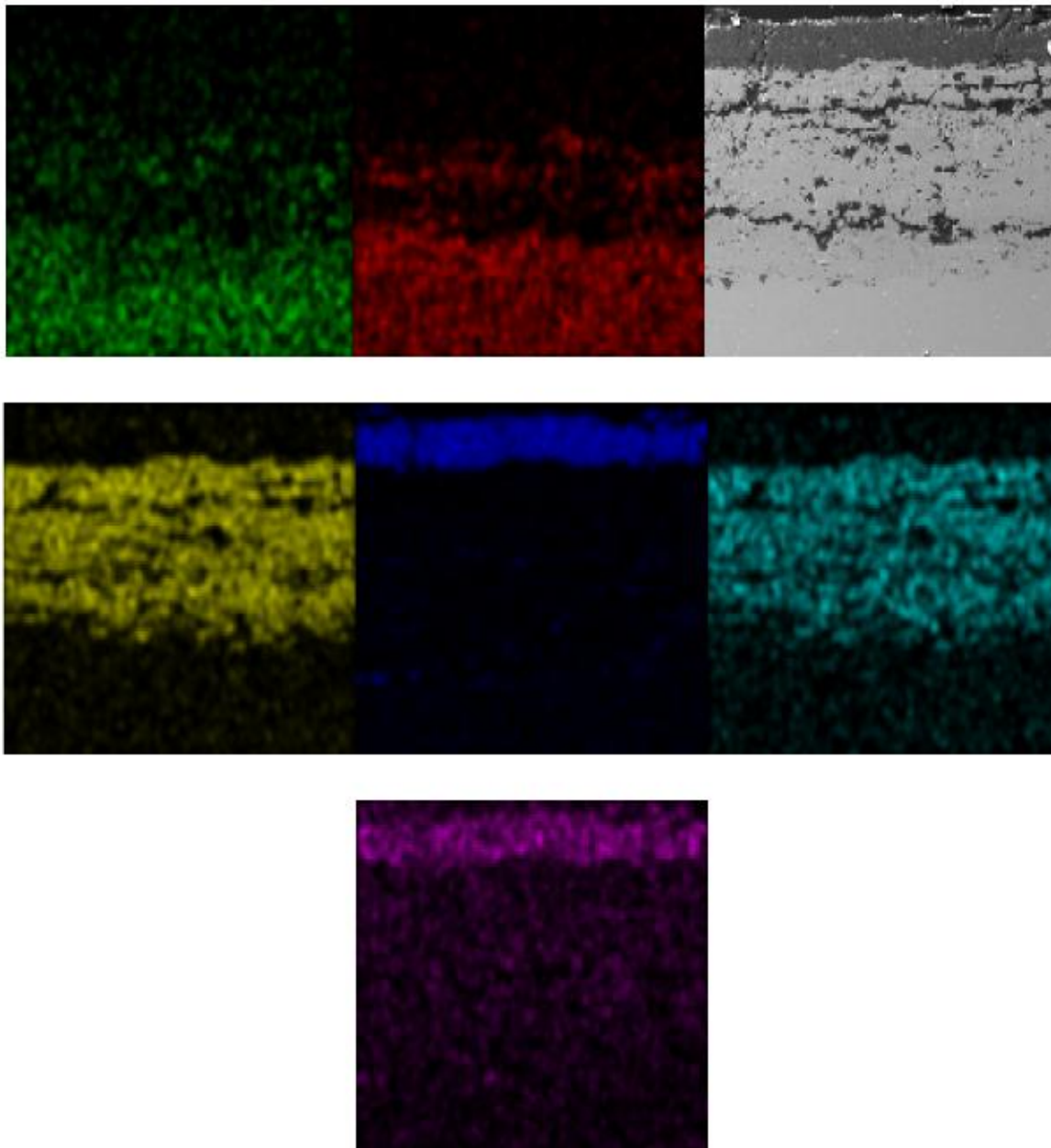
FGM

MCrAlY

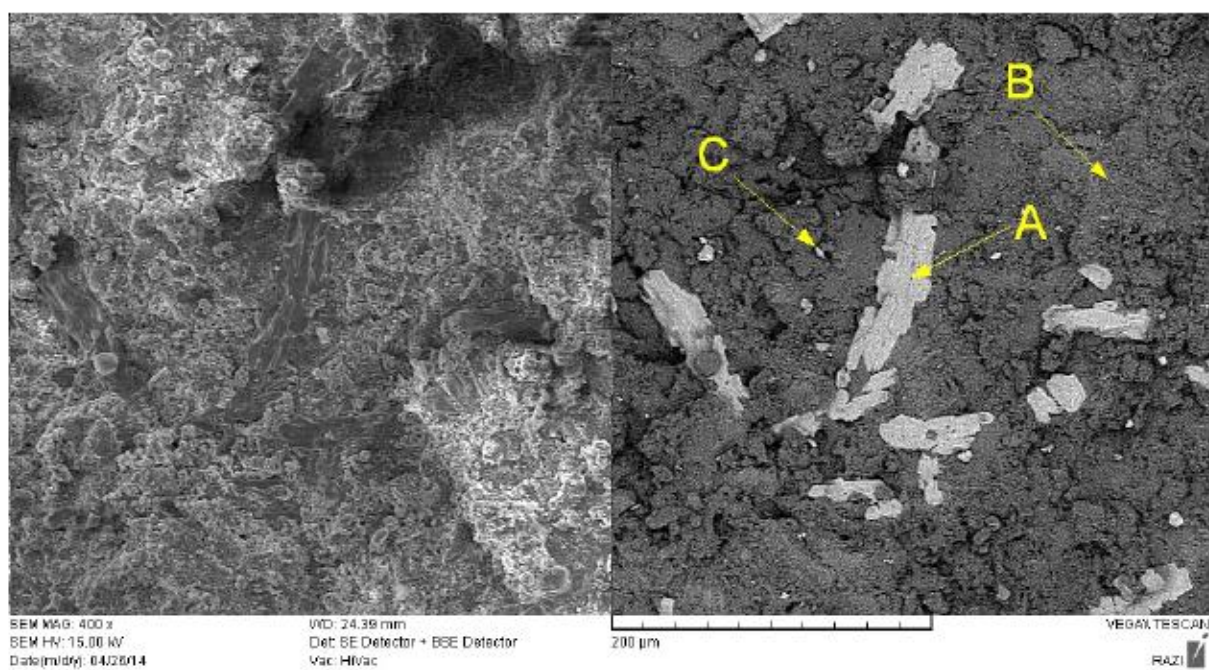
SUBSTRATE

شکل ۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع پوشش سد حرارتی چند لایه با لایه فوقانی آلومینا

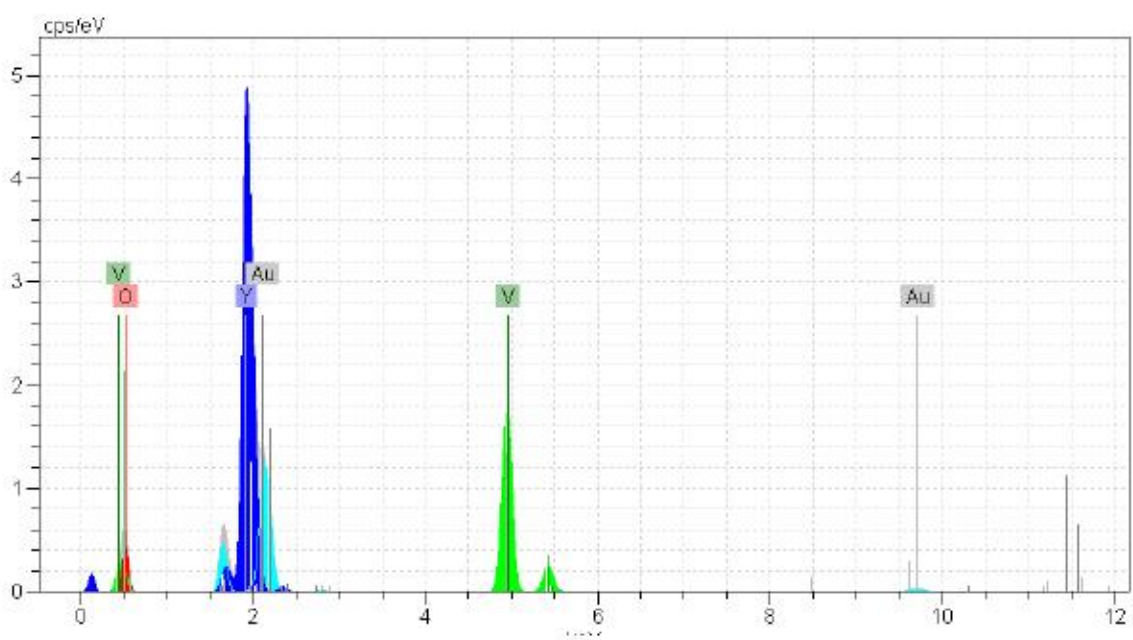
شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل ۵: تصویر آنالیز MAPPING از سطح مقطع پوشش سد حرارتی کامپوزیت لایه‌ای با لایه فوقانی میکرو Al_2O_3

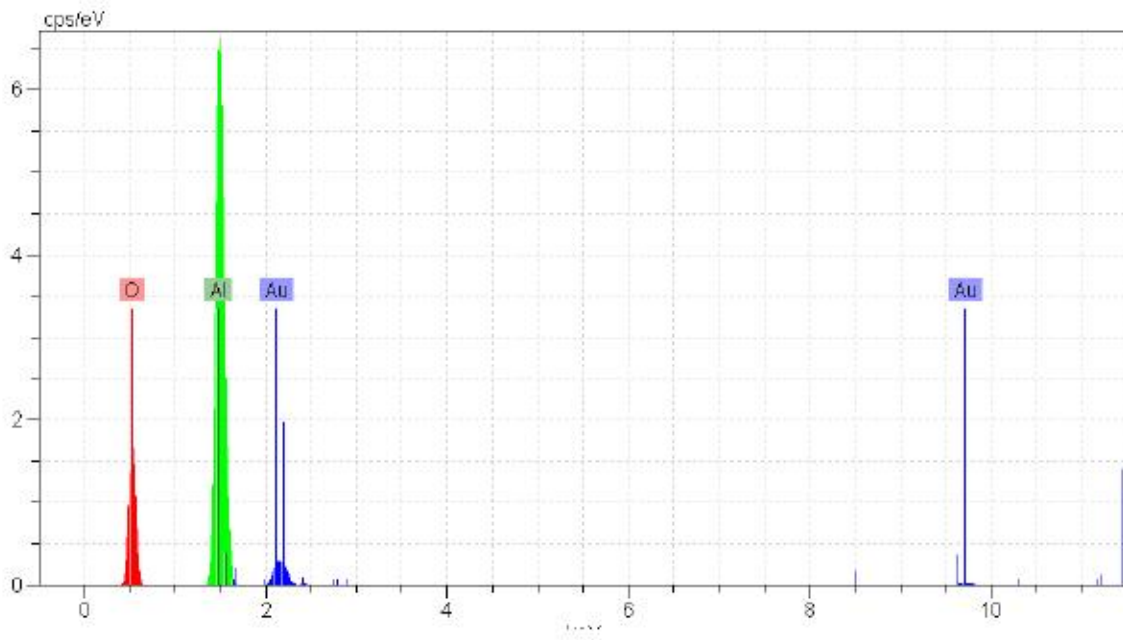


شکل ۶: تصویر میکروسکوپ الکترونی پس از آزمون خوردگی داغ از سطح نمونه میکرو آلومینا

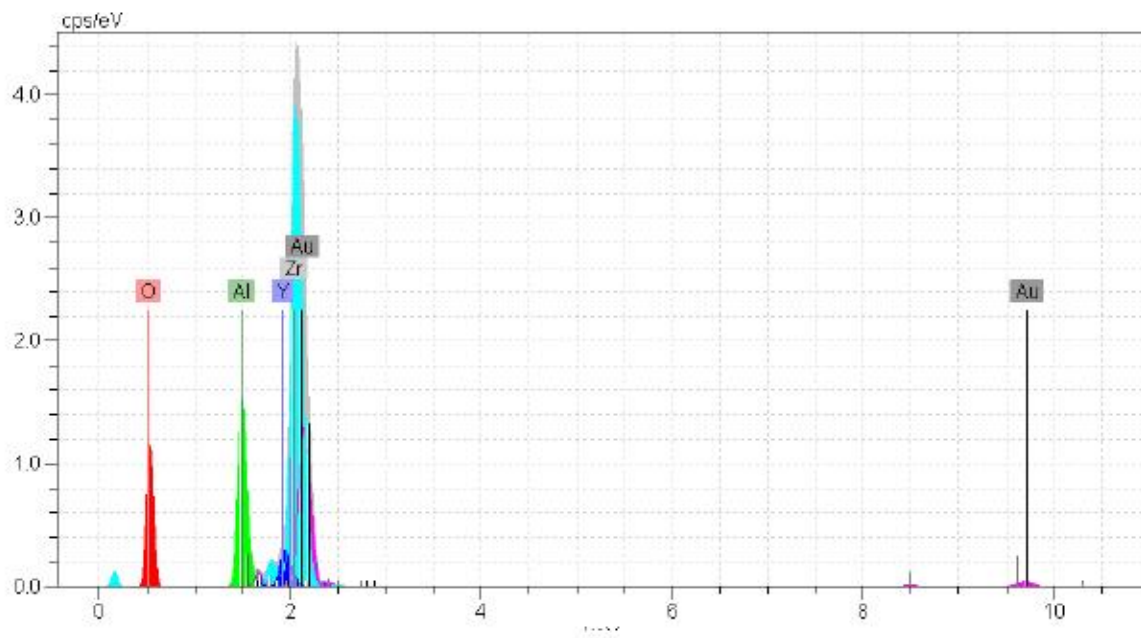


شکل ۷: آنالیز عنصری از نقطه A در شکل ۶

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل ۸: آنالیز عنصری از نقطه B در شکل ۶



شکل ۹: آنالیز عنصری از نقطه C در شکل ۶