

باسمه تعالی
دانشگاه آزاد اسلامی
واحد کرج

عنوان مقاله :
ارزیابی ترکیبات و فازهای موجود در پوششهای
نفوذی آلومینید پلاتینیوم

پدید آورنده :
محمدرضا عاشق گیلوان
مهندسی مواد - متالورژی صنعتی
کارشناس شرکت تولیدی و صنعتی سوپر اکتیو

پائیز ۱۳۸۲

آدرس : کرج - گوهردشت - کوی اتحاد - خ یغمایی - انتهای میثم
- روبروی باغ فاتح - پلاک ۴۱.

M-Ashegh@yahoo.com

چکیده :

درک عمیقتر تبدیل فاز که حین کار موتور توربینی گازی برای انتشار آلومینید پلانتيوم رخ می‌دهد، تحقیقی سودمند خواهد بود. ترکیبات، فازها و زیرساختارهای پوشش انتشاری Al.Pt با استفاده از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی، اسپکتروسکوپی انتشار انرژی، تجزیه اشعه X و ریزپروبها بررسی خواهد گردید. پوشش Al.Pt در شرایط پوشش داده شده و سپس از آزمون اکسیداسیون در دمای 982°C (1800°F) به مدت ۳۰۰۰ ساعت و دمای 1149°C (2100°F) به مدت ۱۰۰ ساعت و یک کوره القایی به طور ثابت آزمایش خواهد شد آزمایشها تغییرات فاز و ترکیبات را که حین انتشار در دمای بالا و فرآیند اکسیداسیون رخ می‌دهند، تعیین می‌نمایند. شناخت فازها و اجزاء، لایه غنی با لایه‌های پوشش Al.Pt منجر به شناخت بیشتری در مورد ریز ساختار پوشش خواهد شد.

مقدمه (Introduction) :

اجزاء و قطعات بخش داغ توربین گازی، نظیر پره‌ها، و فازها در معرض محیط احتراق دما بالا قرار دارند. احتراق به دلیل ایجاد جرقه مخلوط یک سوخت و هوا رخ می‌دهد که محیط اکسیداسیون دما بالا را به وجود می‌آورد. اکسیداسیون دما بالا، واکنش شیمیایی بین اتمهای فلزی اجزاء و اکسیژن محیط گازی اطراف می‌باشد. قطعات بخش داغ از آلیاژهای پایه نیکل ساخته شده‌اند که خواص مکانیکی بسیار خوبی در دما بالا داشته ولی مقاومت اکسیداسیون کافی را ندارند. بنابراین پوشش‌ها، به منظور محافظت اکسیداسیون به منظور افزایش عمر کاری اجزاء برای چند سال مورد نیاز می‌باشند.

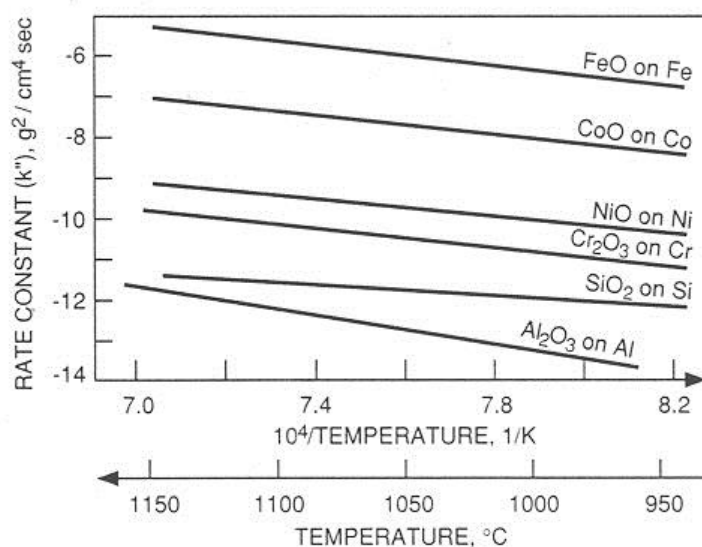
پوشش به عنوان یک لایه سطحی تعریف می‌گردد که قادر به بهبود یا در برخی موارد قادر به جلوگیری از واکنش بین سوپر آلیاژهای پایه نیکل با محیط اطراف باشد مقاومت اکسیداسیون یک ماده بستگی به قابلیت تشکیل رسوب اکسیدی محافظ آن دارد اگر رسوب اکسیدی که از قبل تشکیل شده، متراکم باشد، مانعی برای نفوذ اکسیژن می‌سازد، که پایا و چسبنده می‌باشد.

این رسوب به مثابه سدی بین فلز و محیط عمل نموده و باعث کندي و یا حتی توقف اکسیداسیون بیشتر می‌گردد. آلومینیوم بهترین مجموعه خواص مکانیکی را جهت تشکیل اکسید پایدار دارا می‌باشد. مثلاً یک انرژی آزاد تشکیل بالا آنچنانچه در جدول ۱ نشان داده شده و همچنین نرخ و دهند پایین که بوسیله نمایش ثابتهای سرعت واکنش در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند. به این جهت آلومینیوم به عنوان لایه پوشش سطحی انتخاب شده است. (Ref.I)

Element	Oxide	$-\Delta G_f^\circ$, kJ/g Atom Oxygen
Hf	HfO ₂	459.6 (Most Stable)
Al	Al ₂ O ₃	453.7
Si	SiO ₂	348.9
Ta	Ta ₂ O ₅	321.0
Mo	MoO ₂	303.7

Cr	Cr ₂ O ₃	291.7
W	WO ₂	200.6
Fe	FeO	198.9
Co	CoO	163.2
Ni	NiO	150.3 (Least Stable)

جدول ۱. انرژی آزاد استاندارد تشکیل در 272°C برای اکسید عناصر فلزی معمول در سوپر آلیاژها.

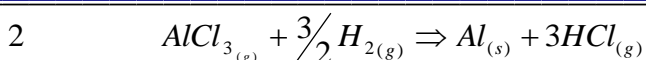


تصویر (۱) - نرخ سرعت رشد اکسیدی

پوششهای آلومینید، تشکیل منبعی از آلومینیوم را می‌دهد که به عنوان یک لایه قربانی شونده، جهت محافظت سوپر آلیاژ عمل می‌نماید. محتوی آلومینیوم پوشش به علت Spallation پیوسته کاهش می‌یابد مثلاً اکسید آلومینیوم بصورت مکانیکی از سطح جدا شده و تشکیل دوباره رسوب اکسید آلومینیوم را می‌دهد: فرآیند تحلیل پوشش شامل یک سری از تبدیل فازها می‌شود تا وقتی که پوشش یا منبع آلومینیوم خالی شود و تشکیل اکسید نیکل از ماده اصلی که محافظت کمتری دارد، رخ دهد.

آلومینیوم به کمک یک فرآیند نفوذی کاشته می‌شود پوشش نفوذی آلومینیوم، شامل نفوذ داخلی بین آلومینیوم کاشته شده در سطح و عناصر شبیه نیکل، کروم، تنگستن و کربن از مواد اصلی و پایه‌ای نیکل می‌شود. روش CVD (کاشت بخارات شیمیایی) آلومینیوم، به

۴

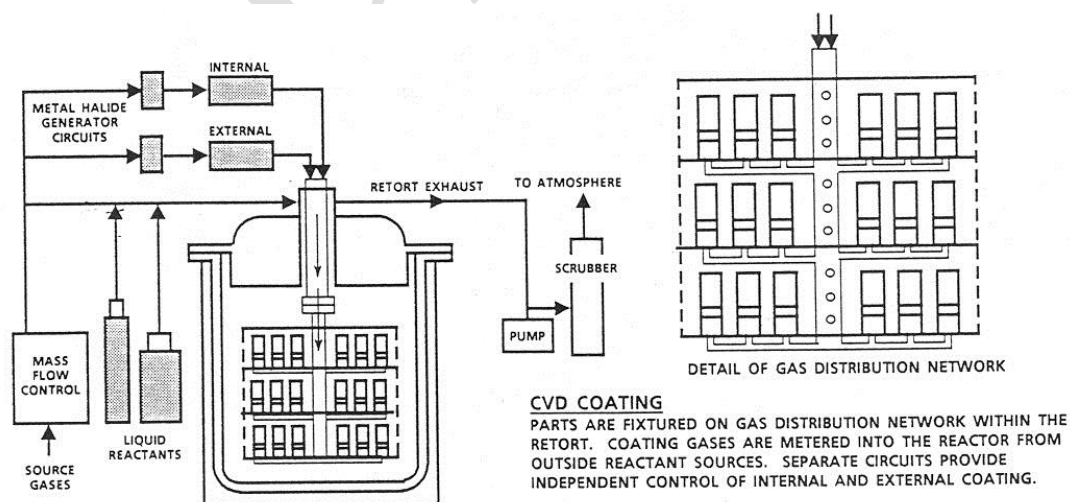


عنوان يك تكنيك جهت تشكيل پوشش آلومينيد بر روي تيغه‌ها و فازهاي يك توربين گازي، به كار رفته است و مواد واكنش دهنده گازي عموماً كلريد آلومينوم و هيدوژن از سوي يك منبع خارجي به يك بخش پوشش دهی از پيش حرارت داده شده انتقال مي‌شوند جايي كه واكنشهاي :

در دمای نسبتاً بالاي (بالتر از 1000°C) رخ مي‌دهند تا نیکل Al-Ni آلومينوم يا آلومينوم Al بر روي در سطح تشكيل شوند. فرآيند CVD آنچنانكه در شكل ۲ نمايش داده شده است باعث فراهم آوردن پوشش نفوذی خارجي با فعاليت پايين مي‌باشد كه در نتيجه يك پوشش دو لايه خارجي بوسيله يك لايه خارجي $(\text{Al-Ni})\beta$ نیکل- آلومينوم تك فاز توليد مي‌نمايد.

به عنوان يك معيار جهت بهبود پايداري اكسيد آلومينوم يك لايه نازك پلاتينوم پيش از آلومينيد نمودن بر روي سطح كاشت الكتريكي مي‌گردد پوشش حاصل يك لايه خارجي $(\text{Al-Ni})\beta$ از پلاتينوم توليد مي‌نمايد. پلاتينوم، نفوذ داخلی ما بين

آلومينوم موجود در سطح و عناصر حاصل از مواد اصلي پایه نیکل را کاهش مي‌دهد بنا براین (Al-Pt) رسوب آلومينوم اكسيد خالصتر و با رشد كمترى را شكل مي‌دهد كه بر خلاف يك آلومينيد ساده چسبندگی رسوبي بيشترى دارد.



تصویر (۲) - نمای شماتیک پوشش دهی نوع CVD

آزمون و فرآیند :

نمونه‌های سوپر آلیاژ پایه نیکل CMSX-4 (جدول- ۲) قطر 1inch در ضخامت $\frac{1}{8}$ inch به کمک پوشش دهی تک فازي (Al-Pt) که توسط روش CVD اجرا شده پوشانیده شدند. آزمایش اکسیداسیون بر روی نمونه‌های تکراری در یک کوره القایی در دمای 982°C (1800°F) به مدت 3000 ساعت و در دمای 1149°C (2100°F) برای 100 ساعت انجام شدند. نیمی از نمونه‌های تکراری که توسط تیغه برشی آلومینیومی برش خوردند، جهت آنالیز برش مقطعی بر روی پایه‌های 1^{inch} اپوکسی قرار گرفته و پولیش شدند. نمونه‌های باقی مانده دست نخورده نگهداری شدند تا سطح بالایی (Al-Pt) آنالیز شود. (SEM) جهت تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی، اسپکتروسکوپی انتشار انرژی، تجزیه اشعه X (XRD) و آنالیزهای میکروپراپ به منظور تعیین ریز ساختار ترکیب و فازهای موجود در شرایط پوشش دهی و اکسیداسیون ارائه گردیدند.

Alloy	Ni	Co	Cr	Mo	W	Ta	Al	Ti	Hf	Re
CMSX-4	bal.	9	6.5	0.6	6	6.5	5.6	1	0.1	3

جدول (۲) - (درصد وزنی عنصري CMSX-4 کریستال منفرد آلیاژ پایه نیکل)

نتایج:

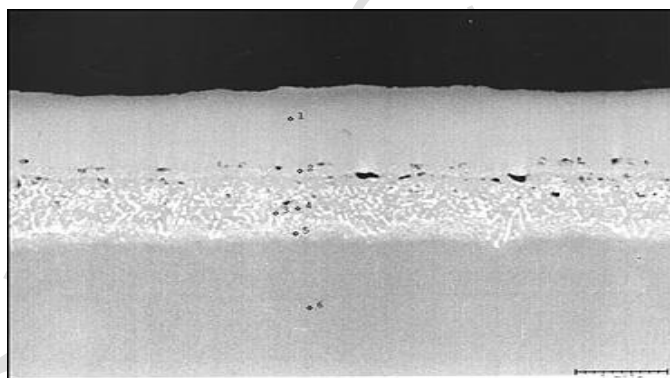
ریز ساختار:

نمونه‌های پوشش داده شده از جهت ریز ساختار پوششی و ترکیب به کمک یک میکروسکوپ الکترونی ISISR-SO که مجهز به یک آنالیزگرانتشار انرژی اشعه X (EDXA) با تکنولوژی گاما پرنیستون

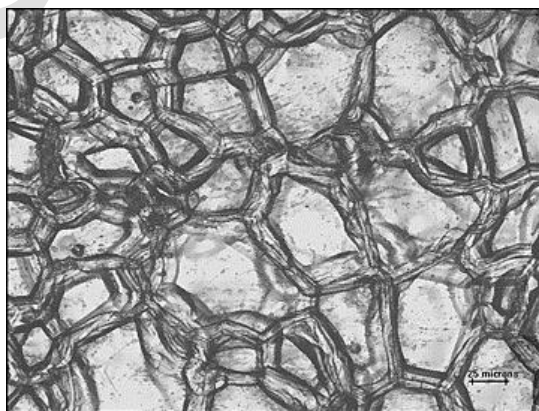
بود، بررسی گردیدند.

شکل ۳ يك عكس تصویربرداری شده الکترونی می‌باشد که ریز ساختار پوشش (Al-Pt) را روی آلیاژ CMSX-4 نشان می‌دهد و شامل يك پوشش تك فاز دو لایه‌ای می‌باشد. لایه خارجی 25 تا 30 میکرونی شامل يك فاز ماتریسی $(Al-Pt)\beta$ غنی از پلاتینیوم می‌باشد. لایه دوم يك منطقه نفوذ با قابلیت تحمل حرارتی بالا با ضخامت 25 میکرونی می‌باشد. پوشش حجم بالایی از ذرات کدر را در مرکز نمایش می‌دهد. این ذرات به عنوان ذرات دانه‌ای آلومینا شناسایی شدند که در آماده‌سازی نمونه به کار رفتند. ضخامت پوشش 50 تا 55 میکرون بود.

لایه بالایی پوشش آلومینید که با استفاده از روش CVD کاشته شد ستونی را تشکیل می‌دهد که به سمت خارج از سطح اصلی آلیاژ CMSX-4 رشد می‌کند (شکل ۴) پهناهای ستون تقریباً 25 تا 65 میکرون ضخامت با 10 میکرون ضخامت ذرات مرزی می‌باشند جهت ترجیحی رشد ستونی بسته به متغیرهای فرآیند CVD شامل جهات $\langle 110 \rangle$, $\langle 211 \rangle$ می‌باشد.



تصویر (۳) - ریز ساختار پوششی (Al-Pt) به عنوان پوشش



تصویر (۴) - سطح پوششی (Al-Pt) به عنوان پوشش

ترکیب:

ترکیب ترکیب پوشش در ۲۵ میکرون از لایه خارجی به کمک آنالیزهای کمی (EDXA) و تکنیکهای میکروپراب اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیریها در لایه خارجی صورت گرفتند چرا که این لایه منبعی از آلومینیوم را تشکیل می‌دهد که به صورت لایه قربانی شونده جهت محافظت از آلیاژ پایه نیکل CMSX-4 عمل می‌کند. آنالیزهای (EDXA) جهت دستیابی به یک ترکیب کلی لایه بالایی که شامل همه عناصر می‌باشد استفاده گردید آنالیزهای میکروپراب جهت تشخیص ترکیبات پلاتینیوم، آلومینیوم و نیکل در سطح پوشش و همچنین جهت تشخیص اثرات نفوذ حین فرآیند دما بالای CVD در هر ۵ میکرون انتخاب شدند. (جدول ۳)

ترکیبات لایه بالایی پوشش Al.Pt

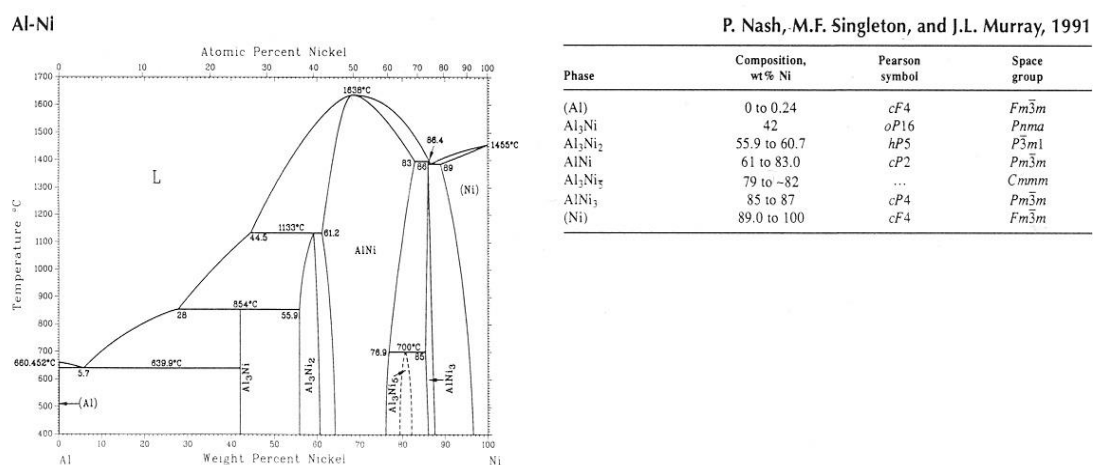
μm from Surface	Microprobe Analysis (Weight %)			EDAX Analysis (Weight %)		
	Nickel	Aluminum	Platinum	Nickel	Aluminum	Platinum
0	54.6	36	9.4			
5	31.7	3.8	0			
10	36.4	4.8	0	49.2	20.8	26.4
15	39.4	5.5	0			
20	42.9	6.2	0			
25	45.1	6.7	0.1			

بصورت آشکار برخی اختلافها در اطلاعات میکروپراب از 5 تا 25 میکرون وجود دارد. ریز ساختار لایه بالایی، آنچنان که در شکل ۳ مشاهده می‌شود. به طور واضح یک لایه تک فاز است. به هر حال، ترکیبات میکروپراب بین سطح مورد مطالعه 25 میکرون اولیه پوشش، بسیار فرق می‌کنند. براساس اطلاعات مقالات، انتظار

می‌رود که لایه بالایی یک فاز نیکل آلومینید غنی از پلاتینیوم باشد، همچنانکه ترکیب میکروپرآب روی سطح و ترکیب (EDAX) در عمق 10 میکرونی از سطح نشان می‌دهد. به علاوه آنالیز فاز در بخش بعدی، حضور فاز β (Al-Ni) را در سطح براساس تجزیه اشعه X (XRD) تایید می‌نماید. نمودار فاز دو گانه نیکل آلومینید (شکل ۵) ترکیب آلومینید را حدود 17 تا 39 درصد وزنی بود. β (Al-Ni) ارائه می‌نماید. این فاز در سرتاسر ترکیب میکرو پرآب در سطح (36% وزنی Al) و ترکیب (EDAX)، 10 میکرون پایین‌تر از سطح (20.8% وزنی Al) تأیید شده است.

در جمع بندی، اعتبار اطلاعات ناشی از میکروپرآب از 5 تا 25 میکرون زیر سوال است و بنابراین فهم اثرات نفوذ در دماهای بالا از این اطلاعات قابل تعیین نمی‌باشند. در مورد دلائل زیر سوال بودن اطلاعات ناشی از میکروپرآبها، با جزئیات بیشتری در قسمت نتیجه گیری بحث خواهد گردید.

تصویر (۵): نمودار فاز دوگانه آلومینید- نیکل



آنالیز فاز:

فاز موجود در سطح پوشش (Al-Pt) توسط تجزیه اشعه X (XRD) تعیین گردید. علاوه بر ساختمان فاز، پارامتر شبکه (a) براساس پیکهای تجزیه اشعه X تعیین گردید. به علت پیچیدگی اطلاعات یافته شده برای پوشش Al-Pt مطالعه بنیانی بر روی پوشش YtriaStabilizedZirconia با نتایج نشان داده شده در ضمیمه ۱ ترتیب داده شد. به علاوه مطالعه‌ای نیز بر روی سطح پوشش (Al-Pt) با نتایج موجود در ضمیمه ۲ انجام گردید. سطح پوشش (Al-Pt) یک فاز β (Al-Ni)

تعیین گردید که در توافق جالب توجه بود که پیکهای 100 و 200 و 210 و 300 تجزیه اشعه x سطح پوششی مشاهده شدند؛ دلیل آن رشد پوشش در یک ساختار ستونی در جهات $\langle 110 \rangle$, $\langle 211 \rangle$ می باشد ، آنچنانکه در شکل ۴ دیده می شود (RefG). بنابراین پیکهای 300,210,200,100 قابلیت تولید در گوشه های کریستال از سطح پوششی را نداشتند .

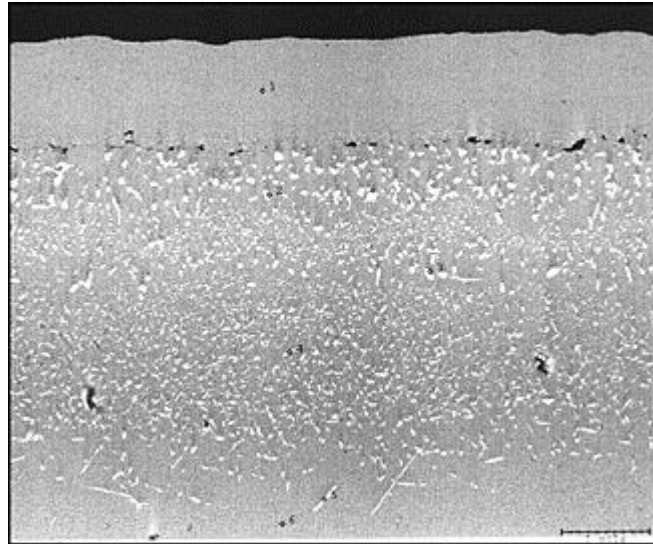
آزمایشات اکسید اسیون:

ریز ساختار:

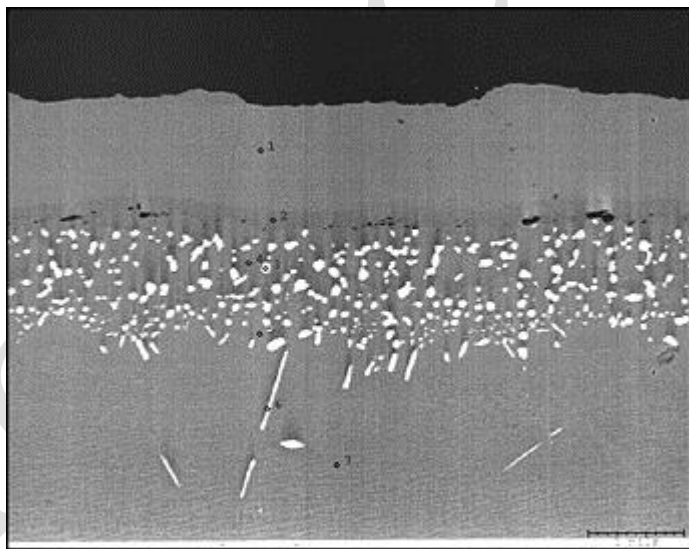
آزمایش اکسید اسیون در 982 (1800) برای 3000 ساعت و 1149 (2100) برای 100 ساعت در یک کوره القایی با اتمسفر ثابت بر روی آلیاژ (CMSX-4) پوشش داده شده (Al-Pt) ترتیب داده شدند. در هر دو آزمون، پوشش؛ یک لایه β (Al-Ni) را بر روی سطح پوششی نگاهداشت. شکلهای ۶ و ۷ عکسهای الکترونی تصویر برداری شده هستند که ریز ساختار پوشش (Al-Pt) را پس از 982(1800) برای 3000 ساعت و 1149 (2100) برای 100 ساعت نشان می دهند. هر دو آزمایش اکسید اسیون تک فاز با دو لایه پوششی تولید نمودند که در آن لایه 25 تا 30 میکرونی خارجی شامل یک ماتریس تک فاز β (Al-Ni) غنی از پلاتینیوم می شود. لایه دوم منطقه نفوذ با قابلیت تحمل حرارتی بالا است که پس از 982 (1800) در 3000 ساعت ، 75 میکرون (تصویر ۶) و پس از 1149(2100) به مدت 100 ساعت 30 میکرون است ، (Fig7) پوششها حجم بالایی از ذرات کدر را در مرکز نشان می دهند این توده ها به عنوان ذرات ریز آلومینا شناسایی شدند که در تهیه نمونه ها استفاده گردید. پوشش، فقط حداقل ضخامت رشد را به علت نفوذ، پس از 1149 °c (2100 °f) برای ۱۰۰ ساعت آزمایش نشان داد. در هر حال، پس از آزمایش 982 (1800) برای 3000 ساعت، تاثیر مدت زمان و دمای آزمایش می باشد. رشد بیشتر ضخامت حتی در دمای پایینتر آزمایش نیز با افزایش زمان آزمایش قابل دستیابی می باشد.

تصویر (۶) - ریز ساختار پوشش (Al-Pt) پس از ۳۰۰۰ ساعت در ۹۸۲

درجه سانتیگراد



تصویر (۷) - ریز ساختار پوشش (Al-Pt) پس از ۱۰۰ ساعت در ۱۱۴۹ درجه سانتیگراد



ترکیب:

ترکیب پوشش ، در فاصله 10 میکرون از سطح ، توسط روش آزمایش کمی (EDXA) اندازه گیری گردید. اندازه گیریها برای نمونه های اکسید شده و پوشش داده شده در مناطق یکسانی انجام گردیدند. (جدول ۴) واضح بود که (Al-Pt) پس از ظهور اکسید اسیون کاهش یابد. میزان آلومینیوم پوشش، به علت پوسته پوسته شدن متوالی و تشکیل رسوب آلومینا کاهش می یابد بدین صورت که آلومینیوم بصورت

مکانیکی از روی سطح برداشته شده و رسوب آلومینا مجدداً تشکیل می‌گردد. میزان پلاتینیوم به علت نفوذ داخلی اضافی با آلیاژ نیکل کاهش یافت به منظور تعیین حضور فاز دو گانه آنچنانکه در شکل ۵ نشان داده شده، غلظتهای Al-Ni قابل برون یابی تا 100% می‌باشند. هر دو نمونه اکسیداسیون، یک فاز β (Al-Ni) تشکیل می‌دهند (۱۷ تا ۳۹ درصد وزنی Al)، تحت شرایط 982، 3000 ساعت و 1194 به مدت 100 ساعت، نمونه دارای 22.2، 25.0 درصد وزنی آلومینیوم می‌باشد.

جدول (۴) - ترکیب پوشش (Al.Pt) پس از آزمایشهای اکسیداسیون

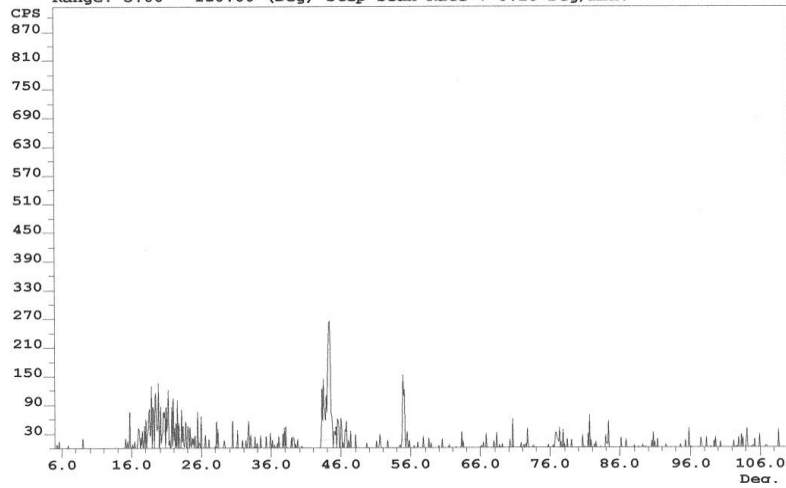
Test Condition	Nickel (wt.%)	Aluminum (wt.%)	Platinum (wt.%)
As-Coated	42.9	20.8	26.4
982°C (1800°F) / 3000 hours	55.4	15.8	16.4
1194°C (2100°F) / 100 hours	59.3	15.3	16.1

آنالیزهای فازی:

فاز موجود در سطح پوشش (Pt-Al) بعد از 982°C و 3000 ساعت و 1194°C و 100 ساعت آزمایش اکسیداسیون، توسط تجزیه اشعه X تعیین گردید. (شکل ۸). پیکهای تجزیه اشعه X (XRD) پس از آزمایش اکسیداسیون میزان خیلی کمی را (کمتر از 300 Cycle/sec به علت نفوذ داخلی بین پوشش و آلیاژ نشان داد. تنها 2 تا 3 پیک قابل دستیابی و تشخیص می‌باشند. به هر حال این پیکها با پیک اولیه (110-111) که در نمونه پوشش داده شده یافت می‌شود، مطابق است. بنابراین سطح پوشش (Pt-Al) تشخیص داده شد که یک فاز β (Al-Ni) (مکعبی ساده) باشد که مطابق با ترکیب می‌باشد. (شکل 8)

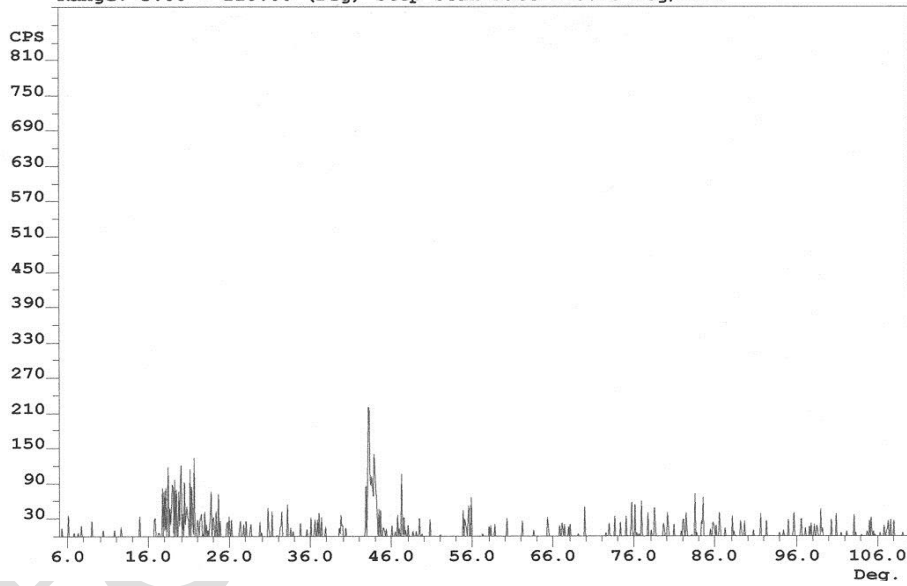
تصویر (۸) الف: سطح پوشش Al.Pt پس از 982°C / 3000 ساعت

File: ptal34, ID: gamma ni3al
Date: 02/24/00 17:27 Step : 0.100° Cnt Time: 0.500 Sec.
Range: 5.00 - 110.00 (Deg) Step Scan Rate : 0.20 Deg/min.

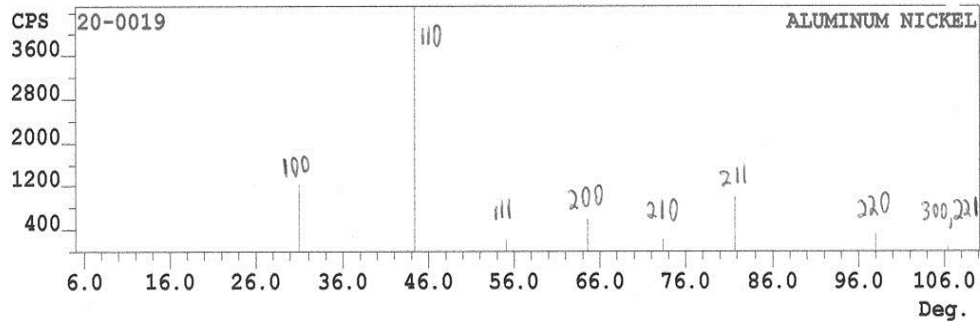


تصویر (۸) ب : سطح پوشش AlPt پس از ۱۱۹۴ / ۱۰۰ ساعت

File: ptal33, ID: pt rich beta nial
Date: 02/24/00 16:57 Step : 0.100° Cnt Time: 0.500 Sec.
Range: 5.00 - 110.00 (Deg) Step Scan Rate : 0.20 Deg/min.



تصویر (۸) ج : Al-Ni PDF card



جمع بندي و نتيجه گيري:

در اين تحقيق تصوير برداري ميكرو سكوپ الكتروني با قابليت (EDAX)، تجزيه اشعه X (XRD) و تكنيکهاي مايكروپراب استفاده گرديد. فازها و تركيبات پوشش (Al-Pt) را در لايه بالاي غني از آلومينيوم، پيش از آزمايش اكسيداسيون و پس از آزمايش اكسيد اسيون تعيين نمايد، در حاليكه نتايج در برخي موارد محدود بودند، هنوز هم اطلاعات كافي وجود داشت تا اينگونه نتيجه گيري شود كه لايه بالاي پوشش يك فاز β (Al-Ni) غني از پلاتينيوم است.

آناليزهاي مايكروپراب انتخاب گرديد تا تركيبات Al و Pt و Ni را در سطح پوشش و هره ميكرون از سطح را تعيين نمايد تا اثرات انتشار حين فرآيند دما بالاي CVD را مشخص كند. متاسفانه آناليزهاي مايكروپراب، نتايج پرسش بر انگيزي را ايجاد نمودند. نتايج پرسش برانگيز بدلايل زيادي بوجود آمدند. مقادير خوانده شده توسط مايكروپراب در سطح نمونه پوشش داده شده نتايج قابل ملاحظه اي را نشان داد. اين قرائت سطحي با استفاده از يك ميله با نوک ۱۰ميكروني كه به تعداد كافي ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ شمارش را حاصل نمودند، امتحان گرديد. اندازه نوک ميله به ۲ ميكرون کاهش داده شد تا نمونه را در برش مقطعي بررسي نمايد و اين كار مقادير را به حدود ۰ تا ۳۰۰۰ مرتبه کاهش داد. با افزايش زمان آزمايش، تعداد كافي مقادير جهت ارائه نتايج بهتر، قابل دستيابي شده است. به علاوه ميله كوچكتر تمايل به انحراف پيدا نمود كه اندازه گيري در يك بخش مختلف نمونه را ايجاد نمود، نهايتاً، اگر استانداردهاي (Al-Ni) غني از Pt ايجاد مي شدند، در مقايسه با استانداردهاي عنصري Al, Ni, Pt، نتايج دقيقتري را ممكن بود ارائه دهد.

در خاتمه، برداشن موثري از ويژگيهاي تكنيکهاي مختلف بدست آمد. تصوير برداري ميكروسكوپ الكتروني با قابليت EDAX، ابزاري پيشرفته جهت تعيين ريز ساختار پوشش بوده و آناليزهاي تركيبی كافي قابل توجهي را ارائه مي كند. مايكروپراب جهت دستيابي به آناليزهاي تركيبی كافي خيلي دقيق استفاده شده است. تجزيه اشعه X (XRD) تكنيك بسيار قوي مي باشد كه نه تنها حضور فازها را تعيين مي كند، بلكه جهت تعيين ساختارهاي كريستالي پارامتر شبکه نيز به همان خوبي بكار مي رود.

: منابع (References)

1. Petit, F.S. and Meier, G.H., 1984, "Oxidation and Hot Corrosion of Superalloys," Proceedings, Fifth International Symposium on Superalloys, The metallurgical Society of AIME, Seven Springs, Pennsylvania, pp. 651-687.
2. Goward, G.W., Boone, D.H., 1971, "Mechanisms of Formation of Diffusion Aluminide Coatings on Nickel Base Superalloys," ASM Transactions, Vol. 60, pp. 228-241.
3. Smith, J.S. and Boone, D.H., 1990, "Platinum Modified Aluminides – Present Status," Paper No. 90-GT-319 presented at the Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Brussels, Belgium.
4. Erickson, G.L., 1995, "A New, Third-Generation, Single-Crystal, Casting Superalloy, Journal of Metals, vol. 47, No. 4, pp. 36-39.
5. Alloy Phase Diagrams, Vol. 3, ASM International, 1992, Sec. 2, Pg. 49.
6. Lee, W, April 1998, "Formation of Grain Boundary in Diffusion Beta Nickel Aluminide Coatings by CVD," Presented at the AGTSR's Metallic Coatings Specialty Workshop, Stevens Institute of Technology, Hoboken, New Jersey.
7. Arrhenius, G., Lecture Notes from Solids in Nature - MATS 290, University of California, San Diego, Winter Quarter 2000.