

가스터빈 엔진부품용 NiCoCrAlY-(Ta, Re, Ir) 코팅의 고온산화특성

최정호, 이동복*

성균관대학교 신소재공학부

High Temperature Oxidation of NiCoCrAlY-(Ta, Re, Ir) Coatings for Gas Turbines

J. H. Choi, D. B. Lee*

School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University,
 Suwon 440-746, Korea

(Received 25 May 2006 ; accepted 15 June 2006)

Abstract

The high velocity oxy-fuel sprayed coatings of 38Ni-23Co-20Cr-11Al-3Y-5Ta, 25Ni-34Co-20Cr-11Al-3Y-2Re and 32Ni-34.5Co-22Cr-11Al-0.5Ir (in wt%) were oxidized at 1000 and 1100°C in air in order to find the alloying effect of Ta, Re and Ir on the oxidation properties of the NiCoCrAlY-base coatings. The primary phase of the coatings was Ni₃Al. The oxides formed on the coatings consisted primarily of α -Al₂O₃, together with some CoCr₂O₄, CoAl₂O₄, and Al₅Y₃O₁₂. Tantalum oxidized to Ta₂O₅ and Ta₂O_{2.2}. However, no oxides of Re and Ir were detected by XRD owing to their thermodynamic inertness and/or their small amount.

Keywords: NiCoCrAlY, Coating, High velocity oxy-fuel spraying

1. 서 론

산업발전용 가스터빈엔진 재료는 주로 Ni계 초합금으로 되고 있으나, 고온의 가혹한 부식환경에 노출되기 때문에 재료의 내구성과 신뢰성은 재료수명과 엔진가동온도에 큰 영향을 미친다. 따라서, 엔진 금속표면에 치밀한 산화막을 형성하여 부식환경에서도 고온내식성을 확보하기 위해 상업적으로는 MCrAlY(M=Ni, Co, Fe) 내열코팅을 적용하고 있다. 특히, NiCrAlY내열코팅의 고온산화시 α -Al₂O₃, NiO, NiCr₂O₄, Cr₂O₃ 등의 산화물이 생성되며, 산화초기에는 산소친화력이 강한 Al이 산화되어 Al₂O₃ 보호피막이 생성되고, NiCrAlY에서 Al이 고갈되어 함량이 약 10 wt% 이하가 되면 NiO, Cr₂O₃와 NiCr₂O₄, NiAl₂O₄, Ni(Al,Cr)O₄ 형태의 스피넬이 형성되는 것으로 알려져 있다¹⁾. 이러한 NiO와 스피넬 형태의 산화물은 성장률이 매우 빨라서 NiCrAlY의 부피를

증가시키며 바깥쪽으로 성장하는 산화물로서 코팅층 취화의 원인이 되어 코팅층을 파손시킨다. NiCrAlY에 Co를 다량 첨가할 경우에도 기지상의 주된 상은 γ -Ni₃Al과 γ -Ni으로 변하지 않으며, 대기 중 산화시험시 NiCoCrAlY의 내산화성은 NiCrAlY과 비교하여 900°C에는 변화가 없었으나, 1000°C에서는 내산화성을 저하되었다²⁾.

본 연구에서는 Ni계 초합금기관에 고속화염 용사법(HVOF; High Velocity Oxy-Fuel)을 이용하여 조성이 Ni-Co-Cr-Al-Y-Ta, Ni-Co-Cr-Al-Y-Re 및 Ni-Co-Cr-Al-Ir인 3종류의 코팅을 용사(thermal spray)한 후, 대기중 1000°C, 1100°C에서 고온산화실험을 실시하였다. 본 연구의 목적은 합금원소인 Ta, Re 및 Ir의 소량 첨가에 따라 NiCoCrAlY계 코팅층위에 생성되는 산화막을 분석함으로써 가스터빈엔진 부품용 코팅층의 제조방법과 조성이 고온 산화특성에 미치는 효과를 조사하기 위함이다.

*Corresponding author. E-mail : dlee@yurim.skku.ac.kr

2. 실험 방법

가스터빈용 소재인 Hastelloy-X(49.0Ni/22.0Cr/15.8Fe/9.0Mo/1.5Co/2.0Al/0.6W/0.15C, wt.%) 기판위에 두께가 약 200 μm 가 되도록 Metco DJ 2600 HVOF용사기기를 이용하여 $\text{H}_2\text{O}_2=5:1$ 분위기하에서 38Ni-23Co-20Cr-11Al-3Y-5Ta, 25Ni-34Co-20Cr-11Al-3Y-2Re 및 32Ni-34.5Co-22Cr-11Al-0.5Ir (wt.%) 분말을 용사코팅하였다. 코팅전에 기판표면에 60 mesh Al_2O_3 그릿을 약 60 psi로 분사하여 표면의 이물질들을 제거하고 거칠기를 증가시켜 접착력을 증진시켰다. $10 \times 10 \times 15 \text{ mm}^3$ 크기로 절단된 시편을 진공로에서 845°C, 24시간동안 가열한 후 1120°C, 2시간동안 세가열하여 용액소둔한 후 노냉하였다. 산화시험은 대기중에서 각각 1000°C, 1100°C로 유지된 전기로내에서 시편을 노출하였으며, 산화에 따른 시편의 조직, 성분분포, 존재상 등을 주사전자현미경(SEM), 미소탐침분석기(EPMA) 및 X선 회절시험기(XRD)를 이용하여 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 HVOF법으로 준비된 38Ni-23Co-20Cr-11Al-3Y-5Ta 용사코팅시편을 1000°C에서 150시간

동안 산화시킨 후의 분석결과이다. 그림 1(a)의 X선 회절 패턴에서 코팅층의 성분으로는 주상으로서 $\gamma\text{-Ni}_3\text{Al}$, 부차상으로서 Cr_3Ni_2 , Ni_3Ta 가 존재하며, 산화물로서는 Al_2O_3 , CoAl_2O_4 , $\text{Al}_2\text{Y}_3\text{O}_{12}$ 및 Ta함금원소의 산화물인 Ta_2O_5 와 $\text{Ta}_2\text{O}_{5.2}$ 가 존재한다. 코팅내에 가장 많이 함유된 Ni는 Al, Cr, Ta 등과 결합하여 Ni_3Al , Cr_3Ni_2 , Ni_3Ta 로 존재하며, Ni는 산소 친화력이 비교적 약하여 산화물인 NiO로 쉽게 산화되지 않아 그림 1(a)에 검출되지 않았다. 코팅내 2년째로 많은 Co는 코팅내에서는 다른 상에 고용되어 그림 1(a)에 검출되지 않으나, 산화시에는 CoO와 Al_2O_3 의 복합물인 CoAl_2O_4 스피넬로 존재한다. Cr은 코팅내에서는 Cr_3Ni_2 로 존재하며, 그 양이 많음에도 불구하고 산화물로서 검출되지 않음은 Cr_2O_3 는 Al_2O_3 와 잔류 고용체를 이루기 때문으로 사료된다. Si는 코팅내에서의 양도 많고 산소와의 친화력도 강하여 쉽게 Al_2O_3 로 산화되며, 일부의 Al_2O_3 는 CoO 또는 Y-산화물과 결합하여 CoAl_2O_4 , $\text{Al}_2\text{Y}_3\text{O}_{12}$ 로 된다. 산화 활성화원소(OAE; Oxygen Active Element)인 Y은 산소와의 친화력이 Al보다 더 강하며, $\text{Al}_2\text{Y}_3\text{O}_{12}$ 와 같은 Y-산화물로 산화되며, 산화과정중 pegging 효과에 의해 산화막의 접착력을 증진시키고, 산화막/포세기면에서의 기공생성을 억제하고, Al_2O_3 산화막 형성시 Al^{3+} 이온의 외방확산을

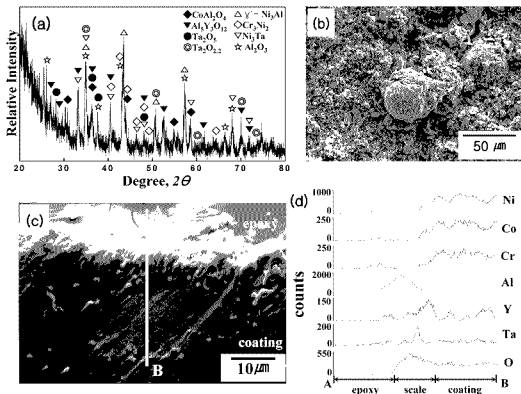


Fig. 1. HVOF-sprayed 38Ni-23Co-20Cr-11Al-3Y-5Ta coating after oxidation at 1000°C for 150 hr. (a) XRD pattern, (b) SEM top view, (c) EPMA cross-sectional image, (d) line profiles of (c).

의제하여 Al_2O_3 가 O^{2-} 이온의 내방확산에 의해 주로 성장하도록 하여 성장응력을 감소시키고, Al_2O_3 입자들 미세화시켜 결정립계확산을 촉진시켜 열응력 하에서도 소성변형을 가능하게 하여 모재와의 접착력을 증진시키는 유용한 역할을 한다³⁾. Monceau 등⁴⁾은 NiCoCrAlYTa를 Ni기 조합금위에 진공 플라즈마 용사(vacuum plasma spray)시킨 후 산화시켰을 때 주 산화물은 $\alpha-Al_2O_3$ 이어서, 산화속도는 무척 느림을 보고하였고, Frances 등⁵⁾은 (22-24)Co-(18-21)Cr-(7.5-9.5)Al-(0.7-0.8)Y-(3.5-4.5)Ta(wt%) 분말을 저압 플라즈마 용사(low pressure plasma spray)시켰을 때 코팅상은 $\gamma-Ni$, $\gamma-Ni_3Al$, $\beta-NiAl$ 및 $\alpha-CrCo$ 상으로 구성되었고 850°C에서 대기중 산화시

켰을 때는 Cr_2O_3 에 의해 약간 변형된 Al_2O_3 가 균일하고 치밀한 산화막을 형성함을 보고하였다. Zhao 등⁶⁾은 NiAl-TaCr 분말을 HVOF 용사법으로 용사시켰을 때 Ta와 Cr을 함유한 NiAl상 조직은 1100°C에서 100시간 동안 산화시켰을 때는 주 산화물은 Al_2O_3 임을 관찰하였다. 본 연구에서는 코팅기판 성분으로서 $\gamma-Ni_3Al$ 상이, 산화물로서는 다량의 Al_2O_3 가 그림 1(a)에 검출되었는데, 각 코팅상과 산화막에 존재하는 화합물은 코팅성분과 산화조건에 따라 변한다. 금속분말은 용사중 부분적으로 용융된 상태로 빠른 속도로 기판에 부딪히기 때문에 원래의 코팅층은 거친 표면을 가지는데, 산화된 용사층의

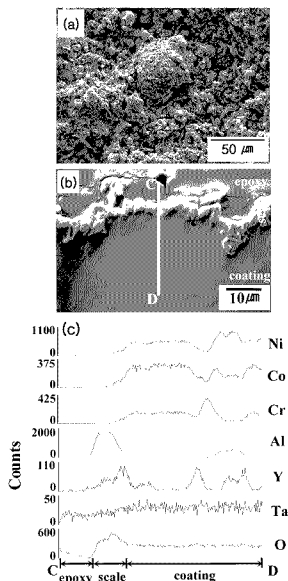


Fig. 2. HVOF-sprayed 38Ni-23Co-20Cr-11Al-3Y-5Ta coating after oxidation at 1100°C for 300 hr. (a) SEM top view, (b) EPMA cross-sectional image, (c) line profiles of (b).

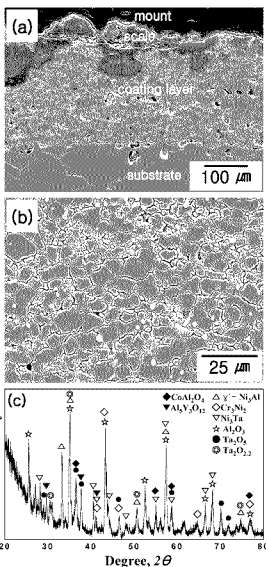


Fig. 3. HVOF-sprayed 38Ni-23Co-20Cr-11Al-3Y-5Ta coating after oxidation at 1100°C for 1000 hr. (a) cross-sectional SEM image, (b) enlarged SEM image of the coating. Etched with (60 ml 90% lactic acid, 10 ml 37% HCl, 65 ml 70% HNO_3) solution, (c) XRD pattern.

표면조직사진인 그림 1(b)에서 전반적인 코팅층 모양은 산화후에도 유지됨을 알 수 있으나, 표면입자들은 미세한 산화물 덩어리로 구성되어 있다. 코팅층 위에 형성된 산화막에 대한 EPMA 횡단면 조직사진과 선분석결과를 그림 1(c)와 (d)에 각각 나타내었다. 용사코팅조성이 국부적으로 불균질하기 때문에 산화막의 두께도 불균질하다. 산화막은 주로 Al로 구성되어 있다. Al과 비교하여 상대적으로 귀한 Ni, Co, Cr 성분은 주요 코팅성분임에도 불구하고, 산화막내에서는 결핍되어 있어 이들 성분은 산화되려는 경향보다는 산화되지 않고 산화막 아래로 밀려 내려오는 경향이 강함을 알 수 있다. 산화막에서의 Al의 소모에 따라 산화막아래에서는 Al이 크게 결핍되어 있다. 그림 1(d)와 같이 Ni, Co, Cr 성분은 코팅층에서 유사한 분포모양을 가지 Cr_2Ni_3 와 같이 이들 성분간의 상호 인력이 강함을 알 수 있다. 코팅구성 성분중 산소와의 친화력이 가장 강한 Y은 산화막과 코팅층 전체에 걸쳐 퍼져있음 존재하여 Al이 Al_2O_3 로 산화될 때 근처에 Y가 있으면 보다 안정한 산화물인 $\text{Al}_2\text{Y}_3\text{O}_{12}$ 로 친이된다. Ta도 산소친화력이 커서 Y와 유사하게 산화막내에 Ta-O형태로 퍼져있음 존재한다.

그림 2는 위와 동일한 38Ni-23Co-20Cr-11Al-3Y-5Ta 용사코팅시편을 1000°C에서 300시간 산화시켰

을 때의 분석결과이다. X선 회절시험에 의하면, 코팅구성성분과 생성된 산화물은 그림 1(a)의 경우와 동일하였으며, 생성된 Al_2O_3 , CoAl_2O_4 산화막내에서의 각종 이온의 움직임은 무척 느려 코팅층을 산화로부터 보호하게 된다. 표면 산화막의 형성을 나타낸 그림 2(a)도 그림 1(b)와 유사하게 거친 표면을 가지고 있다. 코팅층과 산화막에 대한 횡단면 조직사진인 그림 2(b)에서 산화막은 거친 표면을 따라 수 μm 두께로 형성되어 있고, 선분석 결과인 그림 2(c)에서 산화막은 Al_2O_3 로 주로 구성되어 있음을 알 수 있다. Al이 Al_2O_3 를 만들기 위해 소모됨에 따라 산화막 아래에는 10 μm 정도의 폭으로 Al-결핍이 발생하였다. Al과 비교하여 상대적으로 귀한 Ni, Co, Cr 성분은 산화막내에서는 결핍되어 있고, 산화막 아래쪽으로 밀려 내려와 있다. 산소와의 친화력이 가장 강한 Y은 그림 1(d)에서와 같이 코팅내에서의 산화막에서 불균일하게 존재하고 있으나, Ta는 그림 1(d)와 달리 그림 2(c)에서는 background noise level 정도로만 검출되었다. 이는 Ta도 다른 성분들과 유사하게 원 코팅내에 불균일하게 존재하고, 그 함량도 적기 때문으로 사료된다. 이와같이 산화시간이 길어지더라도 산화된 코팅의 표면과 횡단면 형상과 조성분포는 대체로 유지됨을 알 수 있다.

그림 3은 위와 동일한 38Ni-23Co-20Cr-11Al-3Y-

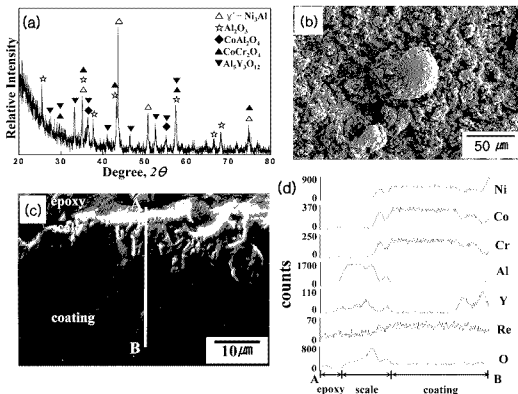


Fig. 4. HVOF-sprayed 25Ni-39Co-20Cr-11Al-3Y-2Re coating after oxidation at 1000°C for 150 hr. (a) XRD pattern, (b) SEM top view, (c) EPMA cross-sectional image, (d) line profiles of (c).

51a 용사코팅시편을 1100°C에서 1000시간 산화시켰을 때의 분석결과이다. 그림 3(a)에 보인 바와 같이, 산화막은 최대 100 μm 두께로 불균일하게 성장하였으며, 산화중에 발생한 성장응력과 시편의 가열/냉각중에 발생한 열응력에 의해 생성된 산화막의 일부가 박리되었다. 시편을 본 조건과 같이 고온에서 장시간 산화시켰을 때, 산화시험전에는 관찰되지 않았던 다수의 조대함 기공이 코팅내에 생성되었는데, 이는 용사코팅시편 제조시 미리 존재하였던 미세한 기공들이 합체되어 성장하고, 코팅조각이 열처리 효과에 의해 조대화됨이 주원인으로 사료된다. 용사중 금속분말은 부분적으로 용융된 상태로 빠른 속도로 기판에 부착되기 때문에 초기에는 상호 혼재되어 미세화되어 있는 상태로 이루어진 단층조직을 가졌던 용사코팅층이 10 μm 내외의 등공 결정립으로 조대화됨을 그림 3(b)는 보여준다. 그림 3(c)는 본 시편에 대한 X선 회절패턴으로서, 코팅상으로서 Ni₃Ta가 추가된 것을 제외하고는 그림 1(a)의 X선 회절패턴과 유사하여 용사코팅층은 고온에서 장시간 가열되더라도 기본 형태는 변하지 않음을 보여준다.

그림 4은 HVOF법으로 준비된 25Ni-34Co-20Cr-11Al-3Y-2Re 용사코팅시편을 1000°C에서 150시간 동안 산화시킨 후의 분석결과이다. 그림 4(a)의 X선 회절패턴에서 코팅층의 주성분인 γ-Ni₃Al상이 뚜렷이 보이며, 산화물로서는 Al₂O₃, CoAl₂O₄, CoCr₂O₄, Al₃Y₃O₁₂가 존재한다. 따라서, 본 용사코팅시편의 고온 산화특성은 38Ni-23Co-20Cr-11Al-3Y-5Ta 용사코팅시편의 경우와 유사하여, 소량의 합금원소 변경침가는 NiCoCrAlY계 코팅의 기본적인 고온 산화특성에 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있다. 본 실험에서 조사한 1000-1100°C에서 0-1000시간 동안 산화시킨 조건에서 합금원소인 Re상 및 Re의 산화물인 ReO₂상은 X선 회절시험에서 검출되지 않았다. 이는 Ta₂O₅와 Ta₂O₃로 산화된 합금원소 Ta와 달리, Re는 산소친화도가 가장 약하고, 코팅내에 소량 함유되었기 때문으로 사료된다. 코팅내에 다량 함유된 Ni와 산화물인 NiO도 X선 회절시험에서 검출되지 않았는데, 이는 Ni와 NiO는 다른 코팅상 또는 산화물내에 고용되기 때문으로 사료된다. 코팅내 가장 많은 Co도 산화시험전에는 코팅내의 다른 상에 고용되어 검출되지 않았으나, 산화시에는 CoO와 각각 Al₂O₃와 Cr₂O₃의 복합물인 CoAl₂O₄, CoCr₂O₄ 스피넬로 그림 4(a)에 존재한다. 세 번째로 많이 존재하는 Cr은 Cr₂O₃ 산화물로 독립적으로 검출되지 않고, 열역학적 자유에너지를 감소시키기 위해 CoO와 결합하여 CoCr₂O₄로 검출된다. Al은

코팅내에서 양도 많고 산소와의 친화력도 강하여 쉽게 Al₂O₃로 산화되고, 일부는 CoO 또는 Y-산화물과 결합하여 CoAl₂O₄, Al₃Y₃O₁₂로 된다. 산소 활성화원소인 Y은 그 양이 가장 작음에도 불구하고 Al₃Y₃O₁₂로 된다. 기존의 NiCoCrAlY-Re계 용사코팅시편에 대한 850-1200°C, 대기중 산화연구에서도 코팅층은 γ-Ni₃Al, γ-Ni, β-Ni₃Al 및 σ-Cr₂Co상 등으로 구성되었고, 950-1200°C에서 0-10,000시간 동안 대기중 산화시켰을 때 Al₂O₃, Cr₂O₃, CoAl₂O₄, CoCr₂O₄, NiAl₂O₄, Al₃Y₃O₁₂ 등이 존재하여 본 연구결과와 유사하였다⁷⁻⁹. 그림 4(b)는 거친 표면 산화

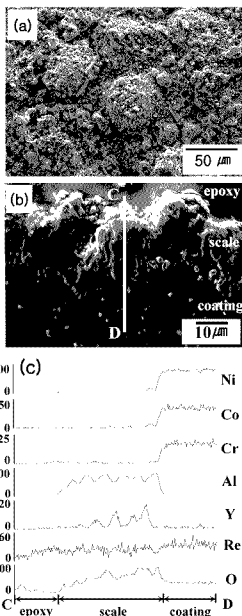


Fig. 5. HVOF-sprayed 25Ni-34Co-20Cr-11Al-3Y-2Re coating after oxidation at 1000°C for 300 hr. (a) SEM top view, (b) EPMA cross-sectional image, (c) line profiles of (b).

박을 보인다. 코팅층과 산화막에 대한 횡단면 조직 사진인 그림 4(c)에서는 수 μm 두께의 산화막이 불균일하게 형성되어 있으며, 코팅층 내부로 산화막이 성장하고 있다. 선분석 결과인 그림 4(d)에서는 Al_2O_3 로 주로 구성되어 있는 산화막과 그 아래에는 10 μm 정도의 폭으로 Al-결집이 관찰된다. Al과 비교하여 상대적으로 귀한 Ni, Co, Cr 성분은 산화막 쪽보다는 산화막 아래쪽으로 밀려 내려와 있다. Al과 함께 산소와의 친화력이 강한 Y은 그림 1(d)에서와 같이 코팅내에서와 산화막에서 불균일하게 존재하고 있으나, Re는 background noise level 정도만 검출되었다. 전반적으로, 산소와의 친화력이 강한 원소인 Al과 Y은 산화막에 쉽게 편중되며, 산소와의 친화력이 비교적 약한 원소인 Ni, Co와 산소와의 친화력이 비교적 강한 원소인 Cr는 산화막 아래쪽에 편중되며, 산소와의 친화력이 가장 약한 원소인 Re는 함량도 적고 쉽게 산화되지 않아 X선 회절시험 및 EPMA분석에서 제대로 검출되지 않았다.

그림 5는 일과 동일한 25Ni-34Co-20Cr-11Al-3Y-2Re 용사코팅시편을 1000°C에서 300시간 산화시켰을 때의 분석결과이다. 그림 5(a)는 표면 산화막의 거친 형상을 보이고 있다. X선 회절시험에 의하면, 코팅구성성분과 생성된 산화물은 그림 4(a)의 경우

와 동일하였다. 코팅층과 산화막에 대한 횡단면 조직 사진인 그림 5(b)에서 산화막은 최대 20 μm 두께로 불균일하게 성장하였다. 선분석 결과인 그림 5(c)에서 Al_2O_3 계 산화막과 직하의 Al-결집층이 보인다. Al과 비교하여 상대적으로 귀한 Ni, Co, Cr 성분은 산화막내에서는 결집되어 있고, 산화막 아래쪽으로 밀려 내려와 있다. 산소와의 친화력이 가장 강한 Y은 코팅과 산화막내에서 불균일하게 존재하고 있으며, Re는 그 함량도 적고 뿔 코팅내에 불균일하게 분포되어 있어 그림 4(d)에서와 같이 background noise level 정도만 검출되었다. 그림 4와 5의 비교에서, 산화시간이 길어지더라도 산화된 코팅의 표면과 횡단면의 형상, 조성분포는 변하지 않고, 단지 산화막만 두꺼워짐을 알 수 있다.

그림 6은 HVOF법으로 준비된 32Ni-34.5Co-22Cr-11Al-0.5Ir 용사코팅시편을 1000°C에서 150시간동안 산화시킨 후의 분석결과이다. 그림 6(a)의 X선 회절패턴에서 산화물로서는 Al_2O_3 , CoAl_2O_4 , CoCr_2O_4 가 존재한다. 코팅층의 주성분인 γ -Ni, Al상이 그림 6(a)에서 뚜렷이 보이며, 산화물상의 회절패턴은 약하다. 합금원소인 Ir상 및 Ir의 산화물인 Ir_2O_3 상은 본 실험영역인 1000-1100°C에서 0-1000시간동안 산화시켰을 때도 X선 회절시험에서 검출되지 않았다. 이는 Ir는 산소친화도가 약하고, 코팅내에 소량

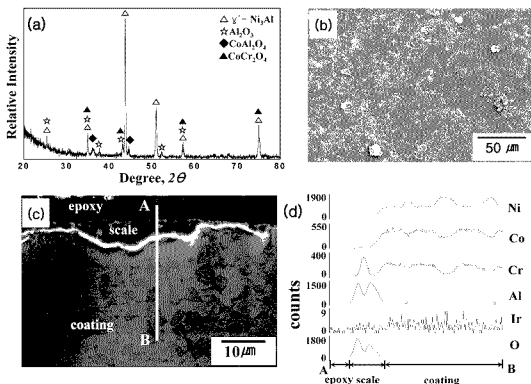


Fig. 6. HVOF-sprayed 32Ni-34.5Co-22Cr-11Al-0.5Ir coating after oxidation at 1000°C for 150 hr. (a) XRD pattern, (b) SEM top view, (c) EPMA cross-sectional image, (d) line profiles of (c).

함유되었기 때문에 사료된다. 코팅내에 다량 함유된 Ni와 산화물인 NiO도 X선 회절시험에서 검출되지 않았는데, 이는 Ni와 NiO는 다른 코팅상 또는 산화물내에 고용되기 때문으로 사료된다. 코팅내 가장 많은 Co도 산화시점전에는 코팅내에서 다른 상에 고용되어 검출되지 않는다. 산화시에는 CoAl_2O_4 , CoCr_2O_4 스페셜로 그림 6(a)와 같이 검출되었다. 코팅내에서 세번째로 많이 존재하는 Cr은 CoCr_2O_4 로 검출된다. 네번째로 많이 존재하는 Al은 양도 많고 산소와의 친화력도 강하여 Al_2O_3 로 산화되고, 이 중 일부는 Co와 결합하여 CoAl_2O_4 로 된다. NiCoCrAl-Ir계 용사코팅시편의 고온산화성질에 대한 연구는 기존에 거의 보고되지 않은 실정이다. 앞에서 설명한 38Ni-23Co-20Cr-11Al-3Y-5Ta, 25Ni-34Co-20Cr-11Al-3Y-2Re 용사코팅시편과 비교하여, Y이 없고 소량 합금원소를 Ir으로 변경하여 첨가한 본 용사코팅시편의 고온 산화특성은 NiCoCrAlY-(Ta 또는 Re) 용사코팅시편에서 관찰된 NiCoCrAlY계 코팅의 기본적인 고온 산화특성과 유사하였다. 그림 6(b)는 평활한 산화표면을 보이고 있는데, 이 모양은 산화진과 동일하였다. 그림 6(c)와 (d)에서는 Al과 Cr이 산화막내에 관찰되며, 산화막 아래에는 Al-결집이 관찰된다. Al과 비교하여 상대적으로 귀한 Ni, Co 성분은 산화막 아래쪽으로 밀려 내려와 있다. Al과 비교하여 상대적으로 귀한 Ir는 그림 6(d)와 같이 background noise level 정도모만 검출되었다. 전반적으로, 산소와의 친화력이 가장 강한 원소인 Al이 산화막을 주로 구성하였고, 두번째로 산소와의 친화력이 강한 원소인 Cr과 코팅내 가장 많이 존재하는 Co도 산화막내 일부 존재하였고, 산소와의 친화력이 비교적 약한 원소인 Ni, Co는 산화막아래에 주로 존재하였는데, 산화시 가열에 따라 이들 성분들이 재배치하여 (Ni, Al)이 많은 지역과 (Co, Cr)이 많은 지역으로 상이 분리되어 그림 6(c)에서와 같이 회색지역과 회색지역으로 분리되어 보였다. 산소와의 친화력이 약한 원소인 Ir는 함량도 적고 쉽게 산화되지 않아 X선회절시험 및 EPMA분석에서 제대로 검출되지 않았다.

그림 7는 알과 동일한 32Ni-34.5Co-22Cr-11Al-0.5Ir 용사코팅시편을 1000°C 에서 300시간 산화시켰을 때의 분석결과이다. 그림 7(a)는 평활한 산화막 표면을 보이고 있으며, 그림 7(c)에서는 산화막의 횡단면이 관찰된다. X선 회절시험에 의하면, 코팅구성성분과 생성된 산화물은 그림 6(a)와 동일하였다. 선분석 결과인 그림 7(c)에서 Al_2O_3 계 산화막과 직하의 Al-결집지역이 보인다. 그림 6(d)에서와 같이 (Ni, Al)이 많은 지역과 (Co, Cr)이 많은 지역

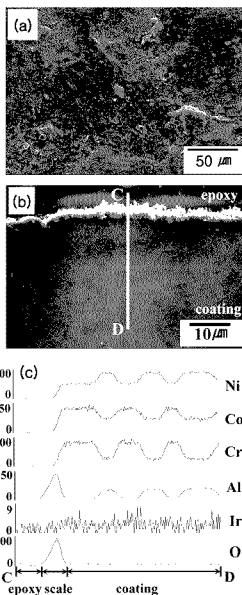


Fig. 7. HVOF-sprayed 32Ni-34.5Co-22Cr-11Al-0.5Ir coating after oxidation at 1000°C for 300 hr. (a) SEM top view, (b) EPMA cross-sectional image, (c) line profiles of (b).

으로 상이 분리되어 그림 7(c)에 나타났다. Ni는 NiAl, Ni_3Al 과 같은 금속간화합물을 만듦만큼 Al과의 결합력이 강하여 Ni가 많은 지역은 Al이 많았다. Ir는 그 함량도 적고 워 코팅내에 불균일하게 분포되어 있어 그림 6(d)에서와 같이 background noise level 정도모만 검출되었다.

4. 결 론

고속화염용사법을 이용하여 NiCoCrAlY-Ta, NiCoCrAlY-Re 및 NiCoCrAlIr 코팅을 준비한 후 $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$ 에서 대기산화시켰다. 다량의 Ni_3Al 상

이 미세하게 혼재되어 있었던 용사코팅층은 산화에 의해 점진적으로 결정립이 조대화되었으며, 코팅구 형성분간의 재배치와 함께 내부 기공도 발생하였다. 산화물의 주 성분은 α - Al_2O_3 이었으며, 부차적으로 $CoCr_2O_4$, $CoAl_2O_4$ 스피넬, $Al_3Y_3O_{12}$ 등도 일부 혼재하였다. 특히, Al은 쉽게 산화되어 산화막에 편중되어 그 직하에는 Al-결핍지역이 존재하였다. 코팅내의 Re와 Ir은 상대적으로 귀하여 쉽게 산화되지 않았으나, Ta는 Ta_2O_5 , $Ta_2O_{2.2}$ 을 형성하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 2005년도 기초전력연구원 주관으로 수행되었습니다(과제번호 : R-2005-B-119).

참고문헌

I. E. Y. Lee, R. R. Biederman, R. D. Sisson, Mater.

- Sci. Eng., A 121 (1989) 467.
2. B. Wang, J. Gong, C. Sun, R. F. Huang, L. S. Wen, Mater. Sci. Eng., A 357 (2003) 39.
3. J. L. Smialek, G. H. Meier, Superalloys II, C. T. Sims, N. S. Stoloff, W. C. Hage(Ed.), Wiley-Interscience Publication, USA (1987) 311.
4. D. Monceau, F. Crabos, A. Malie, B. Pieraggi, High-Temperature Protection of Metals 5, R. Streiff(Ed.), Trans Tech Publication, Uetikon-Zurich (2001) 607.
5. M. Frances, M. Vilasi, M. Mansour-Gabr, J. Steinmetz, P. Steinmetz, Mater. Sci. Eng., 88 (1987) 89.
6. L. Zhao, E. Lugscheider, Surf. Coat. Technol., 149 (2002) 231.
7. W. Brandl, D. Toma, J. Kruger, H. J. Grabke, G. Matthäus, Surf. Coat. Tech., 94-95 (1997) 21.
8. D. Toma, W. Brandl, U. Köster, Surf. Coat. Tech., 120-121 (1998) 8.
9. W. Beele, N. Czech, W. J. Quadakkers, W. Stamm, Surf. Coat. Tech., 94-95 (1997) 41.