

주조용 알루미늄합금의 $Al_2O_3-40\%TiO_2$ 용사층에 대한 마멸특성 평가

채영훈^{*}, 김석삼^{**}

* 경북대학교 기계공학과 대학원

** 경북대학교 기계공학부

(Evaluation of wear characteristics for $Al_2O_3-40\%TiO_2$ sprayed
on casting aluminum alloy)

Abstract

The wear behaviors of $Al_2O_3-40\%TiO_2$ deposited on casting aluminum alloy(ASTM A356) by plasma spray against SiC ball have been investigated experimentally. Friction and wear tests are carried out at room temperature. The friction coefficient of $Al_2O_3-40\%TiO_2$ coating is lower than that of pure Al_2O_3 coating(APS). It is found that low friction correspond to low wear and high friction to high wear in the experimental result. The thickness of $Al_2O_3-40\%TiO_2$ coatings indicated the existence of the optimal coating thickness. It is found that a voids and porosities of coating surface result in the crack generated. As the tensile stresses in coating increased with the increased friction coefficient. The columnar grain of coating will be fractured to achieve the critical stress. It is found that the cohesive of splats and the porosity of surface play a role in wear characteristics. It is suggested that the mismatch of thermal expansion of substrate and coating play an important role in wear performance. Tensile and compressive under thermo-mechanical stress may be occurred by the mismatch between thermal expansion of substrate and coating. This crack propagation above interface is observed in SEM.

keywords: Plasma spray, Wear, Thermal expansion coefficient, Thermo-mechanical stresses, Residual stress.

1. 서론

마멸성이 요구되는 기계부품에 응용되고 있다. 세라믹은 내마멸성, 내부식성 및 고온에서의 산화성 때문에 특수한 기계부품에 적용이 되고 있으나, 가공상의 높은 생산비 및 취성때문에 기계부품에 대하여 널리 적용되지 못하고 있었다. 그러나 최근에 세라믹코팅이 가격, 생산성 및 품질 측면에서 타당성을 가짐으로 기계부품등에 많이 적용되고 있다. 세라믹 코팅방법

중 하나인 플라즈마 코팅은 코팅재료, 가공물의 형상 및 크기 등의 제약이 적어 많이 응용되고 있다. 내마멸성이 요구되어지는 표면에 세라믹을 플라즈마열원을 이용하여 증착시킴으로써 내마멸성을 부여하여, 우주항공, 선박엔진, 강부품류 및 발전기 등에 응용되고 있다⁽¹⁻³⁾.

플라즈마 코팅재로 Al_2O_3 , Cr_2O_3 , WC-Co, TiO_2 등이 연구의 대상이 되고 있다. Al_2O_3 를 기지로 첨가재를 이용하여 파괴인성치 및 내마멸성에 대한 개선에

대해 보고되었으며, 특히 TiO_2 를 첨가하여 기공율, 파괴인성치, 내마멸성의 효과를 보고하고 있다⁽⁴⁻⁶⁾. 트라보시스템에서의 접촉형태에 따른 특성을 조사하기 위하여 플라즈마 코팅한 Al_2O_3 에 대한 선형접촉과 conformal 접촉(실린더와 피스톤링간의 접촉 등의 형태)에서의 미끄럼마멸 특성을 보고하였다. 실제적인 상황에서는 선형접촉보다 conformal 접촉 많이 적용되며, 여기서 실험으로 conformal 접촉의 경우 내마멸특성을 나타내었다⁽³⁾. 그러나 이것은 접촉의 형태에 따라 접촉압력이 다르므로 예상되는 실험적 결과이다. 플라즈마 코팅에 대하여 첨가물의 변화에 대한 마찰 및 마멸특성에 대한 보고를 하고 있다⁽⁷⁾. 이 연구는 첨가물의 종류와 비율에 따라서 마찰 및 마멸 특성이 달라짐을 보여주었다. 플라즈마 코팅의 마멸기구는 많은 연구자에 의해 보고 되고 있으며, 소성 변형, 응착마멸, 취성파괴 및 연삭마멸 등의 마멸기구가 지배하고 있다^(4, 6, 8).

플라즈마 코팅의 마멸특성은 미세조직 형상에 많이 영향을 받고 있다. 플라즈마 코팅의 특성상 모재와의 접착강도보다 스플래트(splat)간의 부착성을 많이 평가되고 있다. 이것은 용사시 용융된 입자들이 상온 또는 강제 냉각에서 발생된 수축으로 인해 압축잔류응력이 존재하기 때문으로 보고되고 있다⁽⁹⁾. 이러한 잔류응력이 박리를 유발시키므로써 코팅두께를 제한하고 있다. 따라서 스플래트의 형상에 대하여 많이 연구되고 있다. 그 이유는 스플래트의 형상이 내부의 스플래트간의 접착력과 기공률의 관계를 가지고 있어, 내마멸성에 영향을 준다.

플라즈마 코팅에 대하여 가공과 가격이 저렴한 강재를 모재로 하여 많이 연구하

였다. 플라즈마 코팅의 응용을 위하여 다양한 재료의 적합성을 검토해야 한다. 실제적인 기계부품의 재료는 강재뿐만 아니라 알루미늄합금 등이 사용된다. 알루미늄합금을 모재로 하여 플라즈마 코팅에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 모재를 강재로 하여 실험한 보고에 의하면, 경도가 큰 모재일수록 코팅의 내마멸성을 향상시킨다⁽¹⁰⁾. 그러나 알루미늄합금에서도 이러한 내마멸성특성을 입증하지 않았다.

알루미나를 기지로한 플라즈마 코팅의 연구에 따르면 TiO_2 를 첨가하면 내마멸성이 향상됨을 실험적으로 입증하였다⁽¹¹⁾. 특히, TiO_2 가 30-40%정도의 배합비일 때, 최대의 내마멸성의 향상을 가짐을 보고하였다. 이 결과를 이용하여 본 실험에서는 알루미늄합금에 대한 플라즈마코팅 특성과 마멸특성을 얻고자 한다. 따라서, 본 연구는 주조용 알루미늄합금 ASTM A356에 플라즈마 용사법으로 Al_2O_3 -40% TiO_2 를 증착하여, 모재의 영향과 코팅의 두께 및 하중에 따른 마멸특성 및 마멸면의 마멸기구를 SEM을 이용하여 규명하고자 한다.

2. 실험

2-1 실험장치 및 방법

마찰·마멸시험기(TOYO BALDWIN Co., EFM-3-E)를 이용하여 데이터는 컴퓨터에 입력하였다. 본 실험에서는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 회전하는 원판위에 볼을 얹어 일정한 하중으로 가압하는 전형적인 볼 온 디스크(ball on disk type)로 마찰·마멸실험을 수행하였다.

본 연구에서는 초음파세척, 건조, 마찰·마멸실험, 초음파세척, 건조, 표면거칠

Table 1 The plasma spraying parameters for Hexa plasma

Parameter	Al ₂ O ₃ -40%TiO ₂
Current [A]	500
Primary gas [l/min]	250 (N ₂)
Secondary gas [l/min]	100 (H ₂)
Powder carrier gas [l/min]	13 (Ar)
Powder inlet position	internal
Feed rate [g/min]	60
Stand off distance [mm]	160
Traverse speed [mm/min]	5000

Table 3 Mechanical properties of specimens

	Vickers hardness, GPa	Thermal expansion coefficient, °C ⁻¹
Al ₂ O ₃ -40%TiO ₂	8.50	7.0 × 10 ⁻⁶
ASTM A356	0.93	17 × 10 ⁻⁶
SiC	28	-

기 측정순으로 측정하였다. 무운활 상태에서 50N 및 100N의 하중과 0.1m · s⁻¹의 속도로 실험하였다. 원판의 트랙(track)부의 직경은 10mm로 실험을 하였으며, 표면거칠기 측정장치(Mitutoyo Surf-500)를 사용하여 마멸부피를 계산하였다.

2.2 시험편

Al₂O₃, TiO₂ 를 각각의 코팅분말은 로 (furnace)에서 작은 입자로 용융되며, 용융 후 부수어서 얻은 것으로 15~45 μm 정도의 불규칙한 입상(grain shape)을 가진다. 60%(Al₂O₃), 40%(TiO₂)로 균일하게 혼합하여 Al₂O₃-40%TiO₂의 분말을 준비하였다. Table 1과 같은 조건의 용사(Hexa Plasma)하였으며, 용사한 뒤 상온에서 냉각하였다. 5%의 기공율을 관리하기 위하

Table 2 Chemical composition(wt,%) of casting aluminum alloy

Chemical element	Al	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn
ASTM A356	95 more	0.25	7.0	0.35	0.35	0.5	0.35

여 용사조건을 조절하였다.

실험에 사용된 모재는 주조용알루미늄 합금 ASTM A356이며, 화학적 조성은 Table 2와 같다. 시험편을 1차 연삭하여 형상 및 크기를 같게 하고, 연마지를 #600Cw, #800Cw, #1000Cw, #1500Cw 및 #2000Cw 순으로 물을 묻혀서 표면조도는 1 μmRmax로 연마하였다. 모든 시험편의 가공전후의 표면조도 측정은 기준길이 8mm로 하여 비교가 될 수 있도록 하였다. 시험편의 형상과 크기는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 하부시험편은 직경 30mm, 두께 10mm의 원판으로 하였다. 코팅전 시험편에 조도를 부여하기 위하여 샌드의 입도 #60, 노즐압력 3.06kPa, 노즐 직경 10mm, 재질은 Al₂O₃로 샌드블래스트(sand blasting)을 하였다. 이때 모재조도는 30 μmRmax로 측정되었다. 코팅후 표면의 열린기공(open pore)제거를 위하여 에폭시실링(epoxy sealing)을 하였으며, 코팅층 표면의 조도 0.1 μmRmax로 연마(polishing)하였다.

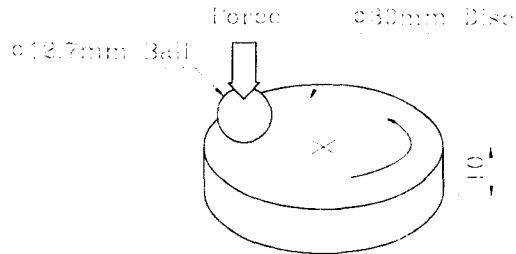


Fig. 1 Schematic illustration of ball on disk type wear test

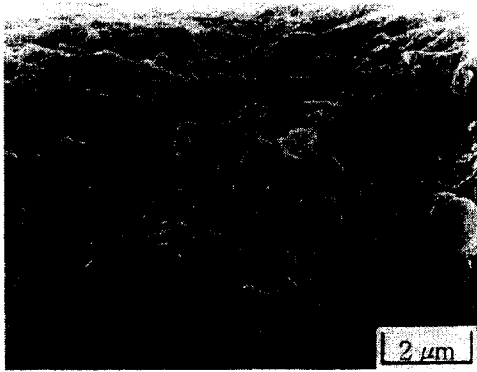


Fig. 2 Microstructure of Al_2O_3 -40% TiO_2 coating

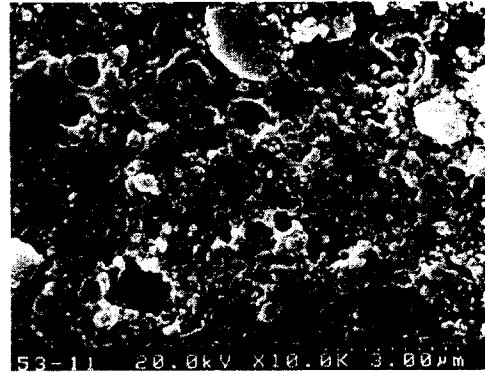


Fig. 3 SEM photograph of hole's pattern in coating

Fig. 2는 용사표면의 전형적인 형상을 보이고 있다. 순수한 알루미늄을 용사한 구조와는 다른 형상을 가지며, TiO_2 의 첨가로 인하여 스프래트경계의 파괴인성치를 향상시키는 원인이 된 것이다⁽¹¹⁾. hole's pattern의 결함을 미세조직으로 Fig. 3에 나타나고 있다. columnar grain이 모재에 수직으로 형성하게 되며, 또한 용사후 냉각과정에서 발생하는 수축으로 인하여 압축잔류응력이 발생하게 된다⁽¹²⁾.

상부시험편은 Fig. 1과 같이 상대적으로 마멸이 되지 않는 직경이 12.7mm의 탄화

규소(SiC)인 볼을 선택하였다. 시험편들의 기계적인 특성을 Table 3에 나타내었다.

3. 실험결과

Fig. 4는 하중 50N에서의 코팅층의 두께를 달리한 마멸곡선을 나타내고 있다. 마멸량은 왕복수에 따라 선형적으로 증가하며, 코팅두께에 따라 기울기의 감소함이 나타난다.

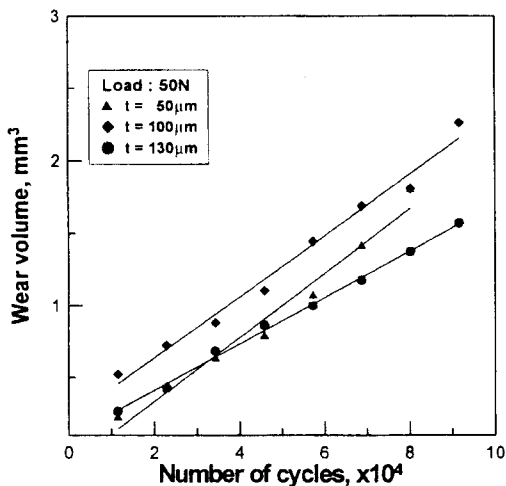


Fig. 4 Variation of wear volume for Al_2O_3 -40% TiO_2 coating under 50N

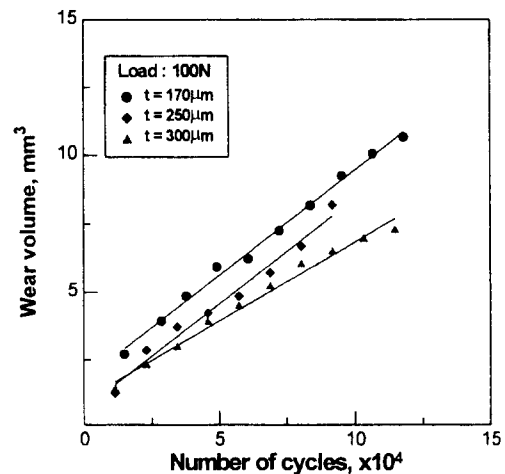


Fig. 5 Variation of wear volume for Al_2O_3 -40% TiO_2 coating under 100N

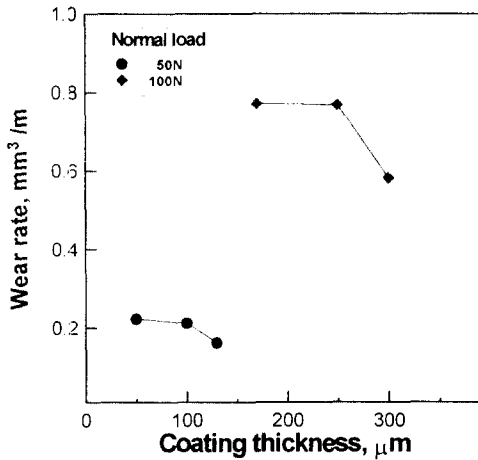


Fig. 6 Variation of wear rate for Al₂O₃-40% TiO₂

Fig. 5는 100N의 하중에서의 마멸곡선이다. 코팅두께 300 μ m에서의 마멸특성이 170 μ m과 250 μ m 두께에 비하여 마멸곡선의 마멸률이 달라 나타나고 있다. Fig. 6는 마멸률에 대한 곡선으로서 300 μ m에서 마멸률이 낮아지는 현상이 나타나고 있다. 이것은 적합한 코팅두께를 나타내는 것으로 250 μ m까지는 마멸률의 변화가 거의 동일한 마멸현상을 나타내고 있다. 이러한 현상은 특정한 두께가 모재의 소성변형을 저지하는 효과이다. 또한 세라믹 용사에서 300 μ m부근이 적합한 코팅두께로 많이 응용되는 것과 잘 일치하고 있다. 이러한 현상을 좀 더 이해하기 위하여 미시적인 관찰이 필요하다. 따라서 SEM을 이용하여 마멸기구를 관찰하고자 한다. Fig. 7은 하중 50N, 50 μ m 코팅두께에서 마멸실험후의 사진이다. 여기서 코팅은 마멸트랙의 중앙부에서 마멸이 진행됨을 나타내고 있으며, 표면에서의 마멸입자 탈락과 스프래트간의 탈락이 나타나고 있다. 또한 소성유동과 fine network cracking이 보인다. 주된

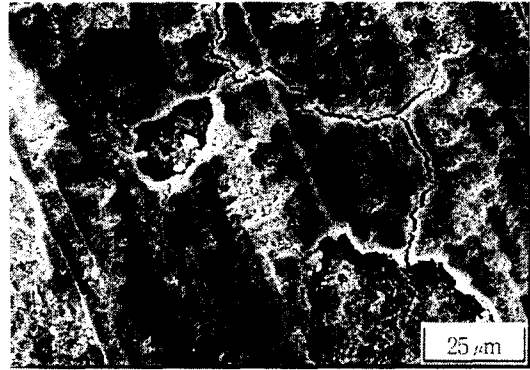


Fig. 7 SEM photograph of worn surface in wear track



Fig. 8 SEM photograph of wear track

마멸의 역할은 소성변형과 연삭마멸현상이 나타나고 있다. 이것은 많은 연구자의 세라믹의 전형적인 마멸현상과 잘 일치하고 있다⁽⁴⁻¹³⁾. Fig. 8는 마멸트랙에서 층상구조의 마멸현상이 나타난다. 이것은 표면에 마찰력으로 인한 코팅층에 인장응력으로 기인된 형상이다.

Fig. 9는 마멸실험중에 결함부인 열린기공(open pore)이 보이는 표면사진이다. 미끄럼방향에서 강한 인장력과 압축력이 작용되었는 것이 나타나고 있다. 인장력에 의하여 스프래트간의 fine network crack의 원인으로 잘 나타나고 있다.

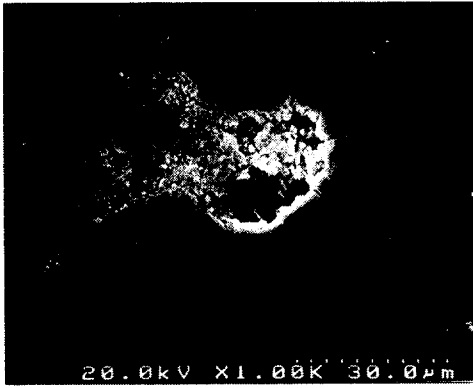


Fig. 9 SEM photograph of crack initiation in wear track

4. 고찰

$Al_2O_3-40\%TiO_2$ 용사층의 마멸특성은 많은 연구자의 마멸현상과 거의 비슷한 경향을 나타내고 있다. 좀더 자세한 모재의 영향을 고려하기 위하여 코팅의 기계적인 특성과 열적인 영향을 고려하고자 한다. 코팅층의 경도는 연삭마멸의 저항성과 잔류응력에 관계, 코팅의 소성변형의 저항성이 마멸특성에 매우 중요한 역할을 하고 있다^(9,10). 또한 용사층의 잔류응력발생은 내부적인 부착강도와 모재와의 접착성에 영향을 준다⁽¹⁵⁾. 예를들면, 코팅의 파괴, spalling 또는 모재로부터의 박리 등이다. 이러한 잔류응력으로 인하여 코팅두께의 조절이 요구되는 이유이다.

서로상대 미끄럼 운동하는 접촉부에서는 열적인 영향을 고려해야된다. 또한 본 실험에서 열적인 영향을 배제될수 없다. 따라서 열적인 영향인 코팅재 및 모재의 열팽창계수의 비교로 잔류응력을 고려하고자 하며, 또한 굽기시험법으로 가시적인 압축잔류응력의 존재를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10은 굽기시험(scratch test)에

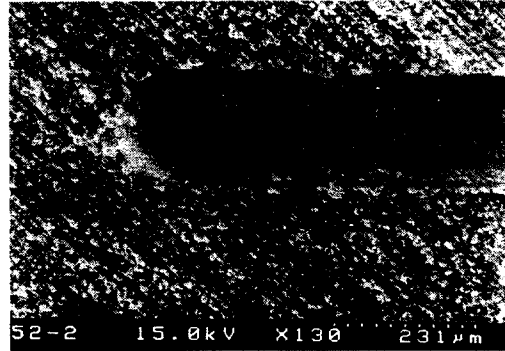
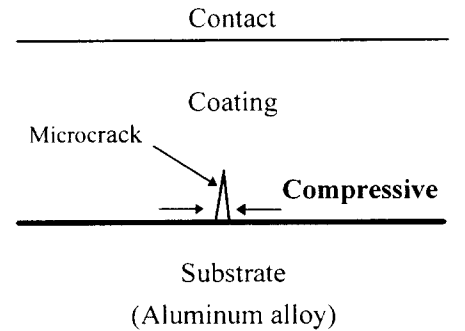
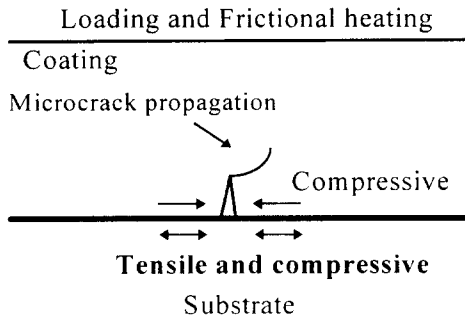


Fig. 10 SEM photograph of scratch test failure



(a)



(b)

Fig. 11 Schematic illustration of wear process

- (a) cracking in subsurface
- (b) crack propagation by thermo-mechanical stress

서 흔적으로써 표면에 강한 인장응력이 작용하여 미끄럼방향의 수직균열이 보이며, 가장자리에 spallation 현상이 나타나므로 압축잔류응력이 존재함을 확인할 수 있다⁽¹⁶⁾. 이것은 용사내부에 압축잔류응력이 존재함을 나타내고 있다. 또한 열팽창계수에 대한 수치적해석은 많은 저자에 의하여 보고 된 바 있으며, 이러한 해석결과를 보면 코팅층 표면결합, 모재와 코팅층사이의 결합, 코팅층내부의 결합중 코팅 파괴에 중요한 역할을 하는 것은 코팅층내부에 존재한 균열이 코팅수명에 가장 많이 영향을 줄 수 수치해석적으로 나타내었다⁽¹⁷⁻¹⁹⁾. 따라서 모재와 코팅간의 열응력과 열팽창계수, 코팅층내부에 존재하는 결합을 고려하면 Fig. 11과 같이 마멸기구를 나타낼 수 있다. 이것은 코팅후에 존재하는 내부압축잔류응력으로 미세균열은 압축응력의 지배를 받을 것이다. 하중과 마찰열에 의하여 하중에서는 코팅층의 수직으로 굽힘응력을 받으므로 응력확대계수의 전단모드가 지배적이며, 열이 모재로 전달됨에 따라 모재와 코팅층의 열팽창계수의 부적합으로 인장과 압축이 반복되어 균열은 인장모드가 지배할 것이다. 그러나 마찰계수에 의한 표면전단을 고려하면 파괴모드는 복합적인 형태로 균열이 전파될 것이다⁽¹⁷⁾. Fig. 12는 코팅층에서 발생한 균열이 진전하여 표면으로 전진하는 사진이다. 이것은 열팽창계수의 부적합으로 기인된 것을 입증하는 것이다.

5. 결론

본 연구는 주조용 알루미늄합금 ASTM A356위의 Al_2O_3 -40%TiO₂ 용사층은 하중에 따라서 마멸량의 증가를 보이며, 코팅의

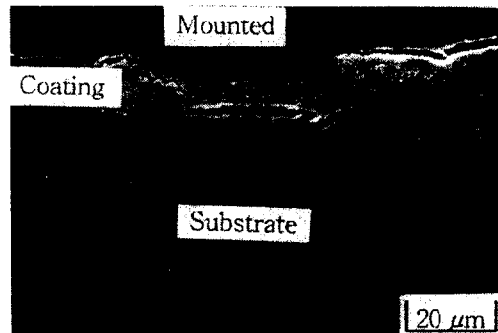


Fig. 12 SEM photograph of crack propagation by thermo-mechanical stress

두께가 마멸률의 감소를 보이고 있다. 또한 내마멸성을 위한 최적의 코팅두께의 존재하고 있었으며, 하중100N조건에서는 300 μ m의 코팅두께가 적합한 것으로 나타났다. 코팅의 마멸은 소성유동, 균열전파, 연삭마멸이 주된 마멸기구이었다.

참고 문헌

1. Nicoll A. R., 1990, "Plasma Spraying : Materials, Applications and Systems for Industrial Coatings," *Meeting H. School Technique*, Gijon, Spain, November.
2. Cuetos J. M., Fernandez E., Vijande R., 1993, "Plasma-sprayed coating treated with lasers: tribological behaviour of Cr₂O₃," *Wear*, 169, pp. 173-179.
3. Fernandez J. E., Rodriguez R., Wang Y., Vijande R., Rincon A., 1995, "Sliding wear of a plasma-sprayed Al₂O₃ coating," *Wear*, 181-183, pp. 417-425.
4. Wang Y., Jin Y., Wen S., 1988, "The analysis of the friction and wear mechanisms of plasma-sprayed coating at 450°C," *Wear*, 128, pp.267-276.
5. Wang Y., Jin Y., Wen S., 1988, "The analysis of the chemical structure and properties of ceramic surface films in friction using SEM, AES and Micro-region X-ray diffraction," *Wear*, 128, pp.277-290.
6. Wang Y., Jin Y., Wen S., 1989, "The

- inspection of sliding surface and subsurface of plasma-sprayed using scanning acoustic microscopy," *Wear*, 134, pp. 399-411.
7. Wei J., Xue Q., 1993, "Effects of additives on friction and wear behaviour of Cr₂O₃ coating," *Wear*, 160, pp. 61-65.
 8. Vijande-Diaz R., Belzunce J., Fernandez E., Rincon A., Perez M. C., 1991, "Wear and microstructure in fine ceramic coatings," *Wear*, 148, pp. 331-233.
 9. Bull A. J., Kingswell R., Scott K. T., 1996, "The sliding wear of plasma sprayed alumina," *Surface and Coating Technology*, 82, pp. 218-225.
 - 10 D.S.Rickerby and P.J.Burnett, "Correlation of process and system parameters with structure and properties of physically vapour-deposited hard coating", *Thin Solid Films*, 157 (1988) 195-222.
 - 11 K. J. Niemi, P. M. J. Vuoristo and T.A. Mantyla, "Properties of alumina based coating deposited by plasma and high velocity combustion processes", *Proc. 5th National Thermal Spray Conf.*, Thermal Spray Research and Applications, ASM International, Anaheim, CA, 1993, p.469-473.
 - 12 R. Vijande, J. Belzunce, E. Fernandez, A. Rincon and M.C.Perez, "Wear and microstructure in fine ceramic coatings", *Wear*, 148 (1991) 221-233.
 - 13 S.Safai, "A microstructural investigation of plasma sprayed metal and oxide coatings", *Doctoral Thesis*, State University of New York, Stone Brook, May 1979.
 - 14 G. Barbezat, A. R. Nicol, Y. S. Jin, Y.Wang and X.Y.Sheng, "Abrasive wear performance of Cr₂C₂-25%NiCr coatings by plasma spray and CDS detonation spray", *Tribology transactions*, 38 (1995) 4, 845-850.
 - 15 R. McPherson, "A review of micro-structure and properties of plasma sprayed ceramic coatings", *Surface and Coating Technology*, 39/40 (1989) 173-181.
 - 16 R.Nicoll, "Plasma Spraying: Matreisl, Applications and Systems for Industrial Coatings", *Meeting H. School Technike*, Gijon, Spain, November, 1990.
 - 17 S. A. G. Oliveira and A. F. Bower, "An analysis of fracture and delamination in thin coatings subjected to contact loading", *Wear*, 198 (1996) 15-32.
 - 18 P. K. Gupta and J. A. Walowit, "Contact stress between an elastic cylinder and layered elastic solid", *ASME J. Lubr. Technol.* 94 (1974) 250-257.
 - 19 J. M.Leroy and B. Villechaise, "Stress determination in elastic coating and substrate under both normal and tangential loads", in D.Dowson, C.M. Taylor and M. Godet(eds.), *Mechanics of Coatings*, Elsevier, New York, 1990, pp. 195-201.