대기 플라즈마 용사 공정에 의해 제조된 철계합금-몰리브덴 혼합 코팅층의 미세조직 및 내마모성

이 일 주* · 박 형 권* · 이 창 희*,†

*한양대학교 신소재공학부

Correlation of Microstructure and Tribological Properties of Mo Blended Fe-Base Coatings Fabricated by Atmospheric Plasma Spraying

Iljoo Lee*, Hyungkwon Park* and Changhee Lee*,†

*Division of Materials Science & Engineering, College of Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

†Corresponding author : chlee@hanyang.ac.kr

(Received July 28, 2014 ; Revised September 18, 2014 ; Accepted October 21, 2014)

Abstract

Atmospheric plasma spraying (APS) is world-widely used process in the automotive industry as a method to provide wear resistance coatings for engine cylinder bore, using various materials. The weight of engine blocks can be considerably decreased by removing cast iron liners, which can finally result in the improvement of fuel efficiency. In this study, five kinds of powder materials, 1.2C steel powder and 1.2C steel powder mixed with 5, 10, 15, 20 wt.% molybdenum powder, were deposited by atmospheric plasma spraying in order to investigate the effect of molybdenum on the wear resistance of coatings. Microstructural analysis showed that molybdenum splats were well distributed in 1.2C steel matrix with intimate bonding. The molybdenum added coatings showed better tribological properties than 1.2C steel coating. However, above the 15 wt.% blending fraction, wear resistance was somewhat degraded with poor roughness of worn surface due to the brittle fracture occurred in molybdenum splats. Consequently, compared to conventional liner material, gray cast iron, 10 wt. pct. molybdenum blended 1.2C steel coating showed much better tribological properties and therefore it looks very feasible to replace gray cast iron liner.

Key Words : Atmospheric plasma spraying, Mo blended Fe-base coating, Microstructure, Wear resistance, Mechanical property

1. 서 론

세계적으로 유가 상승 및 각종 환경 규제 강화에 따라 자동차 연비와 직결되는 소재 경량화에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 자동차 엔진 부품 중 가장 큰 중량을 차지하는 실린더 블록은 기존의 주철소재에서 알루미늄 합금소재로 대체 되고 있는 추세이다¹⁻¹⁰⁾. 이러한 알루미늄 주조 합금의 경우 낮은 기계적 특성으로 인하여 엔진의 실린더와 같이 가혹한 환경에서는 사용이 제한적이기 때문에 주철 라이너(gray cast iron

liner)를 실린더 보어에 삽입함으로써 알루미늄 합금의 단점을 보완하고 있다^{11,12)}. 하지만 주철 라이너의 삽입 시 고온의 엔진 환경에서 알루미늄 합금과 주철 사이의 열팽창계수 차이로 인하여 라이너의 변형이 발생하고, 엔진 중량 및 제조원가가 증가하는 문제를 야기시킨다⁹⁾. 이에 따라 자동차 업계에서는 열용사 코팅 (thermal spray coating) 공정을 이용하여, 실린더 보어 표면에 기계적 특성을 향상시켜줄 수 있는 코팅층을 형성시켜 주철 라이너를 대체하려는 연구가 국제적으로 활발히 이루어지고 있으며, 일부 차량에는 실제로 적용된 사례가 보고되고 있다^{1,6,9,13)}.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Journal of Welding and Joining, Vol.32 No.5(2014) pp65-71

<http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.5.65>

대기 플라즈마 용사(atmospheric plasma spraying) 공정은 고온·고속의 플라즈마 열원에 분말 재료를 용융시켜 모재 표면에 피막을 형성시킴으로써, 재료 표면에 내열, 내식, 내마모성 등의 기능성을 부여하는 기술이다. 대기 플라즈마 용사 공정은 약 15000K에 달하는 열원을 사용하기 때문에 금속뿐만 아니라 세라믹, 카바이드, 복합재 등 다양한 분말재료의 적용이 가능하며 타 용사 공정 대비 공정 단가가 낮아 산업적 적용이 용이하다는 장점을 갖고 있다^{1-4,15)}. 선행연구에 의하면 대기 플라즈마 용사 공정을 이용하여 엔진의 경량화를 통한 연비향상을 기대할 수 있으며, 다양한 복합소재의 적용이 가능 한 것으로 보고되고 있다^{7,14)}. 또한 용사 코팅층 내에 존재하는 기공은 일반적으로 코팅층의 특성을 저하시키지만, 엔진의 실린더에 적용할 경우 코팅층의 최종 호닝(honing) 가공 과정을 통해 표면으로 드러나는 개기공(open pore)들이 오일의 저장소 역할을 함으로서 내부마찰을 감소시켜주는 이점이 있다^{1,15)}.

엔진 실린더 코팅 분말 재료로는 철계 합금 소재가 주로 사용된다. 철계 합금 소재는 다른 분말 재료에 비해 단가가 저렴하고 적절한 합금설계를 통해 원하는 특성을 얻기가 용이한 편이다. 또한 용사 코팅 과정에서 형성되는 FeO가 고상유회제 역할을 함으로써 마찰계수를 감소시켜 미끄럼 내마모특성을 향상시켜줄 수 있다^{4,5)}. 이 밖에도 철계 합금 분말에 세라믹, 고상유회제 등을 혼합한 복합소재를 적용하여 코팅의 내마모성을 향상시키기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

본 연구에서는 대기 플라즈마 용사 공정을 이용하여 엔진 블록 실린더의 주철라이너 대체를 위한 철계 코팅을 실시하고, 철계 코팅층의 내마모성을 향상시키기 위하여 철계 분말에 Mo(Molybdenum)분말을 혼합하여 코팅함으로써, Mo의 혼합 분율이 코팅층의 내마모성에 미치는 영향에 대해 분석하고자 하였다. 이를 위해 각 시편들에 대하여 미세조직 분석 및 내마모성 평가를 실시하고 마모 표면 관찰을 통해 마모 메커니즘을 분석하였으며, 코팅층의 '미세조직-특성'간의 상관관계를 규명하고자 하였다. 나아가 실제 엔진 실린더 보어에의 적용 가능성을 판단하기 위해 주철 라이너 소재와의 내마모성을 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 사용 재료

본 연구에서는 두 종류의 상용 분말을 사용하였다. 철계 합금 분말은 가스 분무법(Gas atomization)으로

제작되었고 구형의 형상을 띄고 있으며, 15~38 μm 의 입도범위를 갖는 분말이다. 철계 코팅분말에 혼합되어 내마모성을 향상시키기 위해 사용된 Mo 분말은 응집 소결법(Agglomerated and sintered)으로 제작된 분말로 구형의 형상을 띄고 있으며, 45~75 μm 의 입도를 갖는 분말이다. 각 용사 분말의 주사전자현미경(SEM) 사진을 Fig. 1 (a), (b)에 나타내었다. 모재로는 엔진 블록의 소재로 많이 사용되는 A356 알루미늄 합금을 사용하였다. A356 합금의 광학현미경(Optical Microscope) 사진을 Fig. 1 (c)에 나타내었고, 실험에 사용된 용사분말 및 모재의 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다. Mo의 분율에 따른 철계 합금 코팅의 기계적 특성 변화를 살펴보기 위하여 철계 합금 분말과 Mo 분말을 각각 0, 5, 10, 15, 20 wt% 분율로 혼합(각각 'Mo0', 'Mo5', 'Mo10', 'Mo15', 'Mo20'으로 표기)하여 코팅을 실시하였다.

Fig. 1 SEM micrograph of (a) 1.2C steel and (b) Molybdenum powder and OM micrograph of (c) A356 Al-alloy and (d) gray cast iron

Table 1 Chemical composition of Used Powders and Substrate

Powder						
Elements, Wt %						
	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
Fe-base powder	1.2	1.5	1.3	0.3	-	Bal
Mo powder	-	-	-	-	Bal	-
Substrate						
Elements, Wt %						
	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Al
A 356 Al alloy	7.6	0.4	0.1	0.6	0.1	Bal

Table 2 APS conditions for coatings

Ar flow rate (L/min)	90~110
H ₂ flow rate (L/min)	5~15
Feeding rate (g/min)	50
Spray distance (mm)	100~125
Arc current (A)	500

2.2 플라즈마 용사 공정

본 연구를 위해 사용된 대기 플라즈마 용사는 Metco사의 9MB기종이 사용되었으며, 아르곤과 수소를 각각 1차 가스와 2차 가스로 선택하였다. 자세한 코팅 공정의 주요 변수는 Table 2에 나타내었다. 코팅에 앞서 코팅층과 모재의 접합 강도를 향상시키기 위하여 모재 표면에 샌드 블라스팅(sand blasting)을 실시하였으며, 표면에 잔류하는 샌드 및 불순물을 제거하기 위해 5분간 에탄올로 초음파 세척을 실시하였다.

2.3 코팅조직 분석 및 특성평가

용사 코팅층의 미세조직을 관찰하기 위해 시편을 수직하게 절단하고 미세 연마하여 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM, SIGMA, Carl Zeiss, Germany)을 이용하여 관찰하였다. 코팅층의 두께 및 기공도는 이미지 분석 프로그램(Image-Pro Plus)을 이용하여 측정하였다. 코팅층과 모재간의 접합강도는 pull-out tester (Romulus, Quad group)를 이용하여 측정하였으며 이를 통해 엔진 적용을 위한 최소 요구조건인 30 MPa를 만족시키는 지 확인하였다. 코팅층의 마모시험을 위해 각 시편을 30 mm × 30 mm의 크기로 절단 후 표면을 평평하게 미세 연마하였다.

기존 주철 라이너 소재와의 마찰·마모특성을 비교하기 위해 회주철 벌크재를 코팅시편과 같은 크기로 가공

Table 3 Wear test conditions

Ar flow rate (L/min)	90~110
H ₂ flow rate (L/min)	5~15
Feeding rate (g/min)	50
Spray distance (mm)	100~125
Arc current (A)	500

하여 표면을 평평하게 미세 연마하였다. Fig. 1 (d)는 회주철의 에칭한 미세조직을 광학현미경을 통해 관찰한 사진이다. 회주철의 미세조직은 α-페라이트 및 펄라이트 기지와 flake형태의 흑연으로 구성되어 있으며, 이 흑연은 층상구조를 갖는 물질로써 미끄럼 마모 시 고상 윤활제로 작용하여 마찰계수를 낮춰주는 역할을 한다^{8,16)}. 마찰·마모시험은 Pin-on-disc 타입의 마모시험기 (Model: EFM-III-F)를 사용하여 실시하였다. 상대재인 핀은 회주철에 경질 크롬도금을 실시하여 실제 상용화된 피스톤링과 유사한 조건으로 제작하였고, 하중 50 N, 마모 지름 20 mm, 회전속도 900 rpm으로 1시간 동안 실시하였으며, 윤활제로는 자동차 엔진 오일(SAE 5W-20)을 사용하였다. 마찰계수는 마모시험 중 모니터를 통해 측정되었으며 자세한 마모 시험 조건은 Table 3에 나타내었다. 마모 시험 후에는 표면 측정기(Alpha-step Surface profiler, KLA-Tencor Corporation)를 사용하여 마모된 시편의 평균 마모 깊이를 측정하였고 이를 통해 마모율을 계산하였으며, 표면 거칠기를 측정하여 마모 전후 표면 거칠기의 변화를 측정하였다. 마모 시편의 표면을 SEM으로 관찰하여 마모 메커니즘을 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 코팅층의 미세조직 분석

Fig. 2 (a)는 철계 합금 코팅층의 SEM 단면 사진

Fig. 2 SEM cross-sectional micrograph of 1.2C steel coating

Fig. 3 SEM cross-sectional micrograph of (a) Mo5, (b) Mo10, (c) Mo15, and (d) Mo20

이다. 이를 고배율로 관찰한 사진인 Fig. 2 (b)를 보면 용융된 철계 합금 분말들이 matrix splat을 형성하였고, splat 사이에 FeO(산화철)막을 포함하는 lamellar 구조를 갖는 것을 알 수 있다. 용융된 철계 분말이 대기 중에서 산소와 반응하여 형성된 FeO는 자가윤활(Self-lubricating)물질로 우수한 트라이볼로지 특성을 갖는 물질이다^{4,5)}. 코팅층과 모재의 계면은 우수한 접합을 보이고 있으며, 샌드 블라스팅으로 인해 수십 마이크로미터 정도의 조도를 나타내고 있다. Nital 에칭을 실시한 고배율의 미세조직 사진을 통해 matrix는 마르텐사이트상을 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 이는 대기 플라즈마 용사 공정의 빠른 냉각속도에 의한 것으로 사료된다. 코팅층의 두께는 약 220 μm, 기공도는 2.1%로 측정되었다(Table 4).

Fig. 3 (a)~(d)는 모두 Mo 혼합 코팅층의 SEM 단면 사진을 나타내며 각각 Mo5, Mo10, Mo15, Mo20 시편을 나타낸다. Mo의 혼합 분율이 증가함에 따라 코팅층 내에 밝은 회색으로 보이는 Mo의 비율이 증가하

Fig. 4 Higher magnification SEM cross-sectional micrograph of Mo20

는 것을 알 수 있다. 또한 Mo이 코팅층 내에서 splat의 형태로 고르게 분산되어 있는 것을 알 수 있으며, Fig. 4의 고배율 미세조직 사진에서 보이는 바와 같이 Mo splat이 철계 합금 splat과 우수한 접합을 나타내는 것을 알 수 있다. 모든 혼합 코팅층의 두께는 약 200~250 μm이며 기공도는 약 1.5% 정도로 측정되었다(Table 5).

3.2 코팅층의 기계적 특성평가

Fig. 5는 모든 코팅 시편의 접합강도를 나타내고 있으며, 모든 시편에서 엔진 적용을 위한 최소 요구조건인 30 MPa을 만족시키는 것을 알 수 있다. 접합강도는 코팅층 내에 Mo 함량이 증가됨에 따라 Mo10까지는 미미하게 증가하나 이후로는 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 접합강도 값의 차이가 편차범위 내에서 존재하기 때문에 Mo 첨가가 접합강도에 미치는 영향은 미미한 것으로 사료된다.

Fig. 6은 모든 코팅 시편 및 주철 벌크재의 마모율과 마찰계수를 나타내고 있다. 코팅 시편의 마모율을 보면 Mo를 혼합하지 않은 철계 코팅시편(Mo0)부터 Mo10

Table 4 Wear test results of coated specimens

	Cast iron	Mo0	Mo5	Mo10	Mo15	Mo20
Friction Coefficient	0.096	0.155	0.077	0.067	0.086	0.087
Wear rate (10 ⁻⁶ mm ³)	5.30	6.36	5.65	5.16	6.08	6.14
Surface roughness (μm)	0.14	0.278	0.231	0.203	0.240	0.254

Table 5 Properties of coated specimens

	Mo0	Mo5	Mo10	Mo15	Mo20
Thickness (μm)	220.13	238.61	219.85	257.03	261.54
Porosity (%)	2.10	1.42	1.73	1.30	1.49
Bond strength (MPa)	36.2	38.2	39.5	37.8	35.7

Fig. 5 Bond strengths of tested materials

Fig. 6 Wear rate and coefficient of friction for tested materials

시험까지는 마모율이 감소하지만, 이후로는 Mo20까지는 증가하는 것을 알 수 있다(Table 5). 마찰계수는 마모율과 유사한 경향성을 나타내는 것을 알 수 있다. Mo10 시험의 마찰계수는 0.067로 나타났으며, 이는 엔진 라이너 소재인 주철 벌크재의 마찰계수인 0.096에 비해 약 30%정도 낮아진 수치이다. 즉, 마모율과 마찰계수 측정 결과를 토대로 Mo이 10% 첨가된 철계합금 코팅이 가장 우수한 내마모성을 나타내는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 7은 Mo 혼합 코팅된 시험의 마찰계수와 마모 표면의 거칠기를 나타내는 그래프이다. 마모 표면의 거칠기는 Mo10 시험까지 감소하며 Mo15 시험부터는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 마모 표면의 거칠기는 마찰계수와 유사한 경향성을 나타내는 것을 알 수 있으며, 이는 표면의 거칠기가 증가할수록 마찰계수가 증가한다는 일반적인 마찰 이론과 일치한다²¹⁾.

본 연구에서 제작된 Mo 혼합 코팅층은 Mo이 첨가되지 않은 철계 분말 코팅에 비해서 우수한 내마모성을 나타내었다. 이는 Mo이 마찰계수 감소효과, 우수한 마모 및 scuffing 저항성을 갖는 물질로써 철계 코팅층내에 분산되어 트라이볼로지 특성을 향상시켜주기 때문인

Fig. 7 Coefficient of friction and surface roughness of worn surface for tested materials

것으로 사료된다^{22,23)}. Mo10 시험의 경우 기존 라이너 소재인 주철에 비해서 향상된 내마모성을 나타내었다. 그러나 코팅 층 내 Mo 분율이 10%를 초과함에 따라 내마모성이 감소하는 결과를 얻었다. 이러한 Mo 분율에 따른 마모 거동의 변화 원인을 파악하기 위해서 마모 표면의 미세조직 관찰을 통해 코팅층의 마모 메커니즘을 분석하였으며, 이를 통해 Mo의 혼합 분율이 내마모성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

3.3 Mo 혼합 코팅층에서의 마모 메커니즘

마모 표면의 미세조직 관찰은 Mo 혼합 코팅층의 다양한 마모 형태가 잘 드러난 Mo20 시험을 통해 실시하였으며, Fig. 8 (a)-(c)에 나타내었다. 전체적인 코팅 시험에서 공통적으로 발생하는 주된 마모의 메커니즘은 표면 피로 마모(surface fatigue wear)에 의한 splat의 delamination과 연삭마모(Abrasive wear)에 의한 슬라이딩 방향으로의 groove 형태를 나타냈다. 표면 피로 마모는 어떤 재료가 다른 재료에 반복적인 하중을 가하면 표면 아래 부분에 균열을 생성하고 이 균열이 전파가 됨으로써 재료가 탈락되는 현상으로, 플라즈마 용사 코팅층의 경우 Fig. 8 (a)에 나타난 바와 같이 주로 splat간의 계면에서 균열이 생성 및 전파되고 splat의 delamination 또는 fragmentation이 발생하게 됨에 따라 나타난다^{5,17,18)}. Fig. 8 (b)는 연삭마모에 의해 슬라이딩 방향으로의 groove가 형성된 것을 보여주고 있다. 이것은 상대재 표면의 미세한 돌기들에 의해 코팅층의 표면이 cutting되어 발생되거나, delamination 등에 의해 탈락된 debris들의 산화에 의해 형성된 경질입자가 두 표면 사이를 구름으로써 발생한 것으로 사료된다¹⁷⁾. Mo이 첨가된 철계 코팅층에서는 앞선 두 가지의 일반적인 마모 메커니즘 이외에 Mo splat의 파괴 현상이 발생한다. 이것은 Mo이 소재 특성상 취성이 높기 때문에 Mo 내부로 균열(crack)이

Fig. 8 SEM micrograph of worn surface of the Mo20 specimen after wear test. (a) Delamination of splat, (b) grooves by abrasive wear, and (c) fracture of molybdenum

생성 및 전파되고 파괴를 일으키기 때문이다^{19,20)}. 따라서 Mo의 혼합 분율이 증가함에 따라 Mo splat의 파괴 분율이 증가하고 이에 따라 마모 표면의 거칠기가 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, Mo을 철계 코팅층에 혼합함에 따라 코팅층의 scuffing 저항성 향상, 마찰계수 감소효과^{22,23)}에 의해 내마모성이 향상되지만, 혼합 분율이 10%가 초과함에 따라 마모 표면의 거칠기가 증가하게 되고 마찰계수 및 마모량이 증가하는 것으로 사료된다. 앞선 마모시험의 결과를 통해 철계 분말에 Mo을 혼합한 코팅층이 철계 코팅층에 비해 내마모성이 향상되는 것을 알 수 있다. 특히, Mo10 시편의 경우 주철 소재에 비해 우수한 내마모성을 나타냄으로써 기존의 주철 라이너를 대체할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 실제 엔진 실린더 보어에 적용하기 위해서는 고온

의 연소실 환경, 다양한 속도 및 하중에서의 마모시험이 진행되어야 하며 이에 따른 마모 메커니즘이 분석이 함께 수반되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 대기 플라즈마 용사 공정을 통해 제작된 철계 코팅층과 Mo 혼합 코팅층의 접합강도 및 내마모성을 조사하였으며, 코팅층의 마모 표면 관찰을 통해 Mo 혼합 코팅층의 마모 메커니즘을 분석하였다. 그리고 그 결과값을 바탕으로 Mo의 혼합 분율이 철계 코팅층의 내마모성에 미치는 영향에 대해 고찰을 실시하였다.

1) Mo은 철계 코팅층 내부에 splat의 형태로 형성되었으며, 철계 합금 splat과 우수한 접합을 나타내었다. 이로 인해 Mo 첨가 후에도 접합강도가 저하되지 않고 엔진 적용을 위한 최소 요구조건인 30 MPa을 만족하였다.

2) 마모 시험 결과 Mo을 혼합한 코팅층의 경우 철계 합금 분말을 그대로 코팅한 시편에 비해 마찰계수와 마모량이 감소하였고, 10% 첨가 시 가장 우수한 마찰·마모 특성을 나타내었다. 그러나 Mo의 혼합 분율이 증가할수록 취성이 높은 Mo의 취성 파괴가 증가하였고, 이에 따라 마모 표면의 거칠기가 증가함으로써 마찰계수와 마모율이 증가하였다.

후 기

이 논문은 한양대학교 교내연구지원사업으로 연구되었음(HY-2013년도)

Reference

1. B. Gérard : Application of thermal spraying in the automobile industry, Sur. Coat. Technol., **201** (2006), 2028-2031
2. B. M Yang, E. S. Byon and K. C. Park : Wear Resistance Characteristics of Thermal Sprayed AlSiMg/SiC Composite Coatings on Aluminum Engine Cylinder Bores, Journal of KWJS, **17-6** (1999), 62-69 (in Korean)
3. E. H. Kim and S. I. Kwun : A Study on Wear Properties of Plasma Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coating at High Temperature, Journal of KWJS, **11-4** (1993), 91-102 (in Korean)
4. B. Hwang, J. Ahn and S. Lee : Correlation of Microstructure and Wear Resistance of Ferrous Coatings Fabricated by Atmospheric Plasma Spraying, Metall. Mater. Trans. A., **33A** (2002), 2933-2945
5. A. Vencel, M. Mrdak and M. Banjac : Correlation of microstructures and tribological properties of ferrous

- coatings deposited by atmospheric plasma spraying on Al-Si cast alloy substrate, *Metall. Mater. Trans. A.*, **40A** (2009), 398-405
6. W. J. Kim, J. G. Kim, Y. S. Kim, Ismail Ozdemir, and Y. Tsunekawa : Wear-Corrosion of Cast Iron Thermal Spray Coatings on Al Alloy for Automotive Components, *MMI.*, **13-4** (2007), 323-327
 7. Y. Enomoto, T. Yamamoto, New materials in automotive tribology, *Tribol. Lett.*, **5** (1998), 13-24
 8. K. Bobzin, F. Ernst, J. Zwick, T. Schlaefer, D. Cook, K. Nassenstein, A. Schwenk, F. Schreiber, T. Wenz, G. Flores and M. Hahn : Coating Bores of Light Metal Engine Blocks with a Nanocomposite Material using the Plasma Transferred Wire Arc Thermal Spray Process, *J. Therm. Spray. Technol.*, **17** (2008), 344- 351
 9. W.J. Kim, S.H. Ahn, H.G. Kim, J.G. Kim, Ismail Ozdemir and Y. Tsunekawa : Corrosion performance of plasma-sprayed cast iron coatings on aluminum alloy for automotive components, *Sur. Coat. Technol.*, **200** (2005) 1162-1167
 10. S. Uozato, K. Nakata and M. Ushio : Evaluation of ferrous powder thermal spray coatings on diesel engine cylinder bores, *Sur. Coat. Technol.*, **200** (2005), 2580-2586
 11. Y. Wang, C. Yao, G.C. Barber, B. Zhou and Q. Zou : Scuffing resistance of coated piston skirts run against cylinder bores, *Wear.*, **259** (2005), 1041-1047
 12. M. Dienwiebel, K. Pohlmann and M. Scherge : Origins of the wear resistance of AlSi cylinder bore surfaces studies by surface analytical tools, *Tribol. Int.*, **40** (2007), 1597-1602
 13. A. Edrisy, T. Perry and A.T. Alpas : Investigation of scuffing damage in aluminum engines with thermal spray coatings, *Wear.*, **259** (2005), 1056-1062
 14. V.D.N. Rao, D.M. Kabat, H.A. Cikanek, C.A. Fucinari, and G. Wuest : Materials systems for cylinder bore applications-Plasma spray technology, *SAE. J-Automot. Eng.*, **1251** (1997), 107-132
 15. G. Barbezat : The state of the art of the internal plasma spraying on cylinder bore in AlSi cast alloys, *Int. J. Automot. Techn.*, **2** (2001), 47-52
 16. K. Bobzin, F. Ernst, K. Richardt, T. Schlaefer, C. Verpoort, G. Flores : Thermal spraying of cylinder bores with the Plasma Transferred Wire Arc process, *Sur. Coat. Technol.*, **202** (2008), 4438-4 443
 17. M. Hahna, R. Theissmann, B. Gleising, W. Dudzinski and A. Fischer : Microstructural alterations within thermal spray coatings during highly loaded diesel engine tests, *Wear.*, **267** (2009), 916-924
 18. Nam P. Suh : The delamination theory of wear, *Wear.*, **25** (1973), 111-124
 19. S. F. Wayne, S. Sampath and V. Anand : Wear Mechanisms in Thermally-Sprayed Mo-Based Coatings, *Tribol. T.* **37** (1994), 636-640
 20. B. Hwang, S. Lee and J. Ahn : Correlation of microstructure and wear resistance of molybdenum blend coatings fabricated by atmospheric plasma spraying, *Mater. Sci. Eng.*, **A366** (2004), 152
 21. S. Seireg : Friction and lubrication in mechanical design, 8-9, CRC Press (1998)
 22. B. Uyulgan, H. Cetinel, I. Ozdemir, C. Tekmen, S.C. Okumus and E. Celik : Friction and wear properties of Mo coatings on cast-iron substrates, *Sur. Coat. Technol.*, **174** (2003), 1082-1088
 23. J. Ahn, B Hwang and S. Lee : Improvement of Wear Resistance of Plasma-Sprayed Molybdenum Blend Coatings, *J. Therm. Spray. Technol.*, **14** (2005), 251-257