

◆특집◆ 자동차부품 및 정밀부품의 성능과 내구성 향상

PVD/PACVD 코팅 개론

김종성*, 정용태**

Introduction to PVD/PACVD Coating

Jongseong Gim*, Yongtae Jeong**

Key Words: PVD (물리기상증착), PACVD (플라즈마 화학기상증착), Hard coating (하드코팅), BALINIT coatings, Tribology (트라이볼로지)

1. 서론

마찰 및 마모거동은 공구 및 정밀부품의 수명에 영향을 미치는 주된 요인 중 하나이다. 이러한 마찰 및 마모거동은 주로 부품의 표면 특성에 따라 좌우되므로 부품의 표면처리방법은 매우 중요하다. PVD/PACVD 코팅은 신뢰성과 함께 경제성 있는 마찰시스템을 설계하는데 있어 그 우수성을 인정받고 있다.

제품 표면에 코팅을 하는 것은 원자재나 디자인을 개선하는 것보다 훨씬 효과적인 결과를 가져온다.

제품에 코팅을 적용하면 성능과 신뢰성이 향상되어 수명이 증가되고, 소형 경량화가 가능해진다. 자동차 엔진과 그 외의 부품에 적용할 경우 에너지 절감 효과가 있고 친환경 요구에 부응할 수 있어 그 효과가 크다.

이제는 공작 기계, 섬유 기계, 플라스틱 사출 성형기 및 식품 가공기 등에 PVD/PACVD 코팅이 표준으로 적용되고 있다. 또한 PVD/PACVD 코팅은 유압펌프 및 밸브의 핵심 부품에 적용되어 그

효과가 증명된 기술이다.

PVD/PACVD 코팅은 엔진 시스템의 성능을 향상시켜주기 때문에 유명 자동차 회사 및 부품 공급업체에서 사용하고 있다. PVD/PACVD 코팅이 적용되는 대표적인 예로 최첨단 디젤 연료 주입 시스템의 캡 밸브와 그 외의 부품 등이 있다.

제품 설계자에게 PVD/PACVD 코팅의 성능을 포함한 내마모성, 내부식성 및 마찰저감을 위한 표면처리방법의 개요를 소개한다.

2. 마모 마찰 메커니즘

마모문제를 해결하기 위해서는 마모에 영향을 주는 인자와 시스템을 면밀히 분석해야 한다. 재료나 설계를 변경하는 방법보다, 부품의 표면을 개선 처리하는 엔지니어링 프로세스가 더욱 효과적이다.

2.1 마모시스템

마찰시스템은 두 상대물 간의 접촉면으로 구성된다. 마찰과 마모는 재질과 형상으로부터 가장 많은 영향을 받고, 그 다음으로 오일, 물과 같은 윤활유의 영향을 받는다. 또한 접촉하는 표면에 분포하는 여러 종류의 이물질과 입자에도 영향을 받는다. 영향을 미치는 또 다른 인자로는 작업 온도, 작용하중, 마찰속도, 회전속도 및 진동 등이 있다. 이러한 모든 인자들이 마찰과 마모에 직접

*울리콘발저스코팅코리아(유) 대표이사/공학박사
Tel. 031-680-9991, Fax. 031-683-9905
Email jongseong.gim@oerlikon.com
**울리콘발저스코팅코리아(유) 이사/공학석사
Tel. 031-680-9981, Fax. 031-683-8896
Email yongtae.jeong@oerlikon.com

적인 영향을 준다.

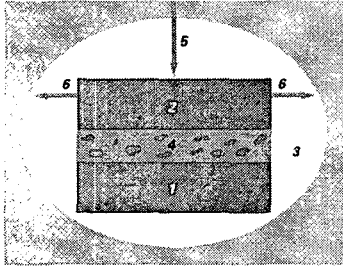


Fig. 1 Tribosystem

2.2 마찰

마찰시스템에서 마찰은 두 상대물의 접촉 상태에 따라서 분류된다

건조 마찰(Dry friction)은 접촉면이 직접 접촉을 할 때 발생한다. 경계 마찰(Boundary friction)은 접촉하는 표면 사이에 윤활제가 있을 때이며, 건조 윤활과 혼합 윤활의 중간 상태에 해당한다. 혼합 마찰(Mixed friction)은 건조마찰, 경계마찰 및 유체마찰이 혼합된 상태이다. 이러한 경우 접촉면의 일부는 고체간에 직접 접촉하고 다른 일부는 윤활막으로 분리된다. 유체 마찰(Fluid friction)은 접촉면이 윤활막에 의해서 완전히 분리된 마찰이다.

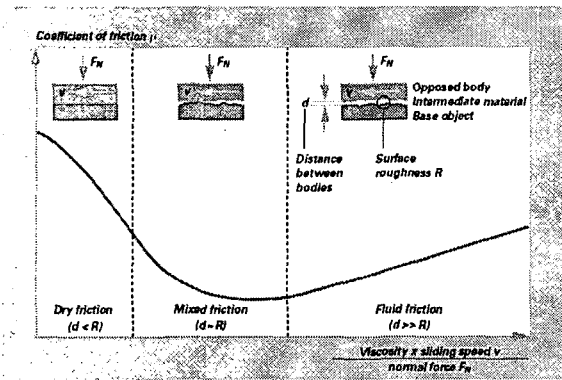


Fig. 2 Stribeck curve: schematic graph of friction

이러한 모든 마찰은 두 상대물이 운동할 때 일어나며, 마찰에 영향을 미치는 모든 요인을 감안하여 마찰계수 μ 로 표현되는 마찰 법칙을 따르게 된다. Stribeck curve (Fig. 2)에서 보듯이 마찰시스템에서 유체마찰이 되는 경우 마찰계수가 특히 낮지만 이러한 상태는 적절한 윤활시스템 설계가 뒷받침 되어야 실현된다. 통상의 경우 윤활유가 사

용되어도 혼합마찰과 경계마찰은 완전히 예방할 수 없으며, 특히 마찰이 시작되거나 멈출 때에는 피할 수 없다.

2.3 마모 메커니즘

마모는 두 물체가 상대운동을 할 때 접촉면에서 미세한 입자들이 이탈되는 현상으로 정의되며, 모든 기계 장치에서 불가피하게 발생하는 현상이다.

응축, 부식, 절삭, 피로, fracture 및 화학적 상호작용 등이 마모의 원인이며, 대부분의 경우 한가지 원인에 의해서 발생하는 것이 아니라 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하여 나타난다.

연삭마모(abrasive wear)는 거칠고 단단한 표면에 연질의 표면과 상대운동을 할 때 연질의 표면에 절삭작용을 함으로써, 연질 표면의 물질이 떨어져 나오는 형태의 마모를 말한다.

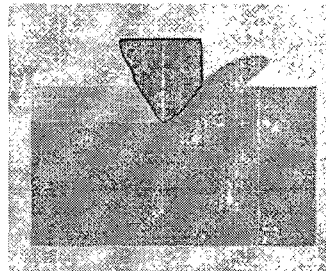


Fig. 3(a) Abrasive wear

응착마모(adhesive wear)는 동일한 성분 또는 화합물을 형성하기 쉬운 성분으로 구성되어 있는 두 부품의 표면에서 윤활막이 형성되지 않을 경우 발생된다.

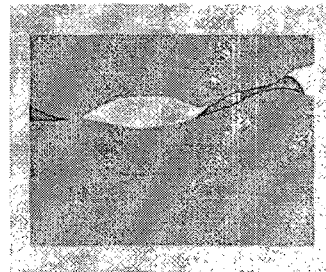


Fig. 3(b) Adhesive wear

표면피로마모(Surface fatigue)는 표면의 한 부

분에서 반복적인 상대운동이 있을 때 발생한다. 반복하중은 표면 혹은 표면 아래에 크랙을 발생시키는데, 이 크랙이 결과적으로 표면의 파괴를 야기하게 된다.

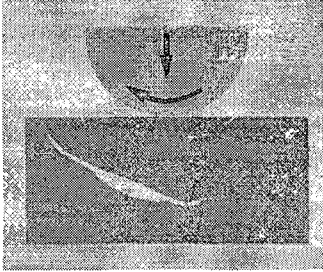


Fig. 3(c) Adhesive wear

마찰-산화(Tribo-oxidation)는 부식이 일어나기 쉬운 환경에서 상대운동이 일어날 때, 주위환경과 접촉 표면과의 화학작용으로 생긴 화합물이 표면으로부터 떨어져 나가는 것을 말한다.

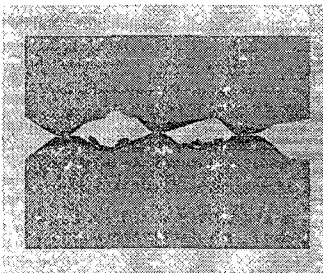


Fig. 3(d) Tribo-oxidation

내마모성을 향상시키기 위해 소재의 구성 성분을 조절하는 경우 내마모성을 강화시키는 반면 내부식성이 나빠질 수 있다. 이 외에도 비용, 설계, 기능 및 환경 친화성 등의 요인도 염두에 두어야 한다.

그 반면에 부품의 표면 처리는 더 좋은 결과를 제공한다. 즉, 설계나 재료를 바꾸지 않은 상태에서 마모를 감소시키므로 수명 연장, 높은 내구성, 용이하고 저렴한 유지 보수, 환경 친화성, 자원절약, 내부식성 및 저가의 소재사용과 같은 효과를 가져올 수 있다.

3. 경쟁력 있는 표면처리 기술

정밀 부품에 적용되는 표면 처리 방식 중, PVD와 PACVD 코팅은 많은 이점을 가지고 있다.

우수한 내마모성을 가질 뿐 아니라, 마찰계수가 낮고, 경도 및 코팅층의 두께 조절이 가능하다.

3.1 표면 처리 공정

DIN (German Institution for Standards) Guideline 8580에는 크게 두 가지 종류의 표면처리 공정이 있다.

하나는 가스 혹은 증기 상태에서의 전해 증착법 (electrodeposition), 고온 스퍼터링 (thermal sputtering) 혹은 증착 (deposition)과 같은 PVD/PACVD 공정에 의한 코팅이고 또 다른 것은 질화법 (nitriding), 인산염피막 (phosphating), 보로나이징 (boronising), 이온 주입법 (ion implantation)과 같은 방법에 의한 재료의 특성을 변경하는 것이다.

부품 표면 처리의 생산에 주로 사용되는 공정은 플라즈마 코팅(PVD, PACVD), 인산염피막, 질화법 및 전해/화학 도금 등이 있다. 정밀 부품의 표면 처리에 사용되는 방법 중 질화법이나 전해 도금에 비해 PVD/PACVD 이 많은 이점이 있다. 인산염피막, 질화법 및 전해/화학 도금의 경우 소재의 선택이 제한적이다. 가장 많이 사용되는 표면 처리법인 전해/화학 도금 표면처리법은 크롬, 니켈 등을 사용하기 때문에 청산염, 중금속, 불화물 및 기름류 등의 반응조 부산물이 생기는 등 생태학적 문제점도 있다. 그리고 질화법에 의한 표면처리법은 과도한 하중에서 마모를 충분히 견딜 수 없다. 그러나 PVD/PACVD는 이러한 점에서 더 나은 대안으로 제시한다.

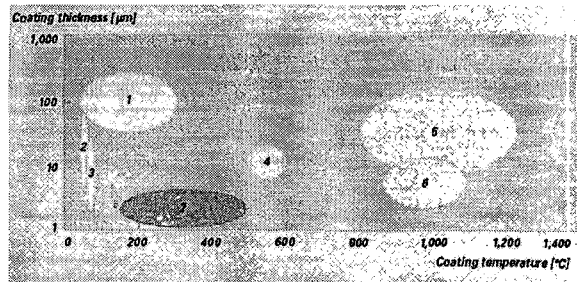


Fig. 4 Coating thicknesses and process temperatures

PVD/PACVD 공정은 Fig.4와 같이 여러 면에서 우수 특성을 보인다.

코팅의 적용 범위가 넓다. 티타늄, 크롬, 알루미늄과 같은 고순도의 금속 재료는 이온 충격으로 스퍼터링 되어 모재에 코팅된다. 동시에, 유입된

반응 가스 (질소 또는 탄소를 함유한 가스)는 이온화 상태의 금속과 반응하여 공구 또는 부품의 표면에 강한 밀착력을 가진 화합물 형태의 박막으로 코팅된다.

부품 코팅에 사용되는 PVD/PACVD 코팅 공정은 비교적 낮은 온도에서 이루어진다. 코팅의 종류에 따라 250℃ 또는 500℃까지 온도를 상승시켜야 한다. 특히, 경도 감소를 막으려면 코팅 온도는 소재의 열처리 온도보다 낮아야 한다.

코팅의 두께는 일반적으로 0.5~4 μm으로 비교적 얇은 편이다. 따라서, 부품 형태의 변화, 형합성, 치수등을 유지시켜 주어 후처리 공정이 필요 없다.

PVD/PACVD 는 친환경적인 공정이며 오염물질을 사용하거나 배출하지 않는다. 가스로는 활성 가스(수소, 아세틸렌)와 불활성 가스(아르곤)를 사용한다.

3.1.1 윤활 측면에서의 PVD/PACVD 코팅의 장점

PVD,PACVD 코팅은 우수한 내마모성을 제공한다. 각 조건에 따른 내마모, 스키핑, 내식성의 비교 분석을 Table1 에서 나타내었다. PVD/PACVD 코팅공정이 상대적으로 우수함을 보여준다.

Fig.5 는 표면 처리된 부품과 표면 처리 되지 않은 부품간의 마모와 표면 피로 특성을 건조 상태의 Sliding-wear 테스트를 통하여 비교한 결과이다. WC/C 코팅이 열악한 환경에서도 낮은 마찰계수를 갖고 있다는 것을 보여준다.

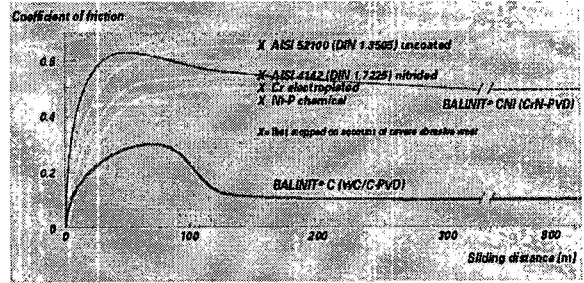


Fig. 5 Dry-running/sliding wear test

3.2 PVD/PACVD 공정

앞 부분에서 정밀 부품에 적용되는 PVD (Physical vapor deposition)와 PACVD (Plasma assisted chemical vapor deposition)의 관점에서 코팅의 장점을 설명하였다. 이어서 플라즈마를 기반으로 하여 정밀하고 유연하게 코팅할 수 있는 코팅 방법인 sputtering, ion plating, arc evaporation 및 PACVD 를 살펴보기로 한다.

스퍼터링 (cathodic sputtering) 코팅 공정의 첫번째 단계는 진공 챔버 내에 코팅할 제품을 장입하여 가열 하는 것이다. 두번째 단계는 표면 에칭 공정으로, 챔버내에 알곤 가스를 주입하면 알곤 가스가 이온화되어 금속 표면의 미세한 원자단위의 표면오염까지 제거해준다. 에칭 공정이 끝나면, 코팅재료(target)에 높은 음 전압을 가하고 알곤 가스를 주입하여 이온화 시킨다. 알곤 가스는 양이온이기 때문에 음의 코팅재료 표면에 빠른 속도로 충돌하여 원자 상태의 코팅 재료를 표면으로부터

Table 1 Applications of surface treatment processes

Process	Protection against		Corrosion	Application areas
	Scuffing	Abrasion		
Electro- or chemical plating (hard chrome, chemical nickel)	+	+	+++	Chemical apparatus, food industry, hydraulics
Diffusion processes (nitriding, nitrocarburisation, boronising)	+	++	+	Engine components, tools
Plasma spraying	+	++	++	Turbine vanes
CVD (thermal)	++	++	+	Tools
PVD hard coating (TiN, TiCN, TiAlN)	++	++	+	Tools, motor sports
PVD hard coating (CrN)	++	++	++	Machine parts, machinery, tools
PVD carbon-based coating (WC/C)	+++	++	++	Machinery, engine components, fluid technology, motor sports
PACVD carbon-based coatings (a-C:H)	+++	+++	++	Machinery, engine components, motor sports

떼어낸다 (sputtering). 기화된 금속 원자들은 유입된 활성가스와 반응하여 고경도의 코팅층을 형성한다.

한 예로, 실리콘발저스코팅에서는 WC/C 코팅시 sputtering 방법을 사용한다. 코팅 재료로는 텅스텐을 사용하고, 활성가스로는 탄소를 사용한다.

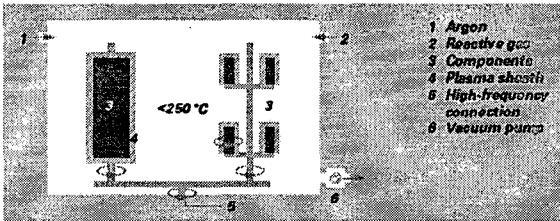


Fig. 6(a) Sputtering

위에서 설명한 전통적인 스퍼터링 코팅을 개선하는 방법으로, 진공 챔버 중앙에 저 전압 아크를 발생시켜 보다 강한 플라즈마를 생성하여 알콘 가스의 이온화를 강화시키는 방법이 있다.

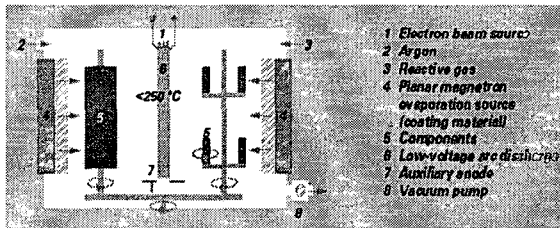


Fig. 6(b) Enhanced sputtering

이온 플레이팅 (Ion plating) 방법 중 하나는 반응성 전자빔 증발법이다. 스퍼터링 방법이 알콘 이온의 충돌하는 힘으로 금속 코팅 재료를 떼어내 데 비하여, 이온 플레이팅법은 저 전압 아크를 이용하여 금속 코팅 재료 (티타늄, 또는 크롬)를 증발시키는 방법이다. 실리콘발저스 코팅의 BALINIT[®]A (TiN 코팅)는 ion plating 방법을 적용한 예이다.

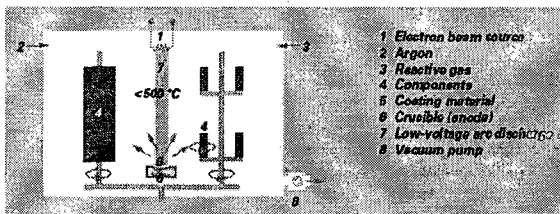


Fig. 6(c) Ion plating

아크 증발법 (Arc evaporation)은 아크를 이용하여 금속 코팅 재료(target)를 증발시켜 코팅하는 방법이다. 증발된 재료는 높은 전류 밀도와 전력 밀도로 인하여 높은 에너지를 가진 플라즈마 상태로 이온화되므로 활성가스와 반응하여 코팅하고자 하는 공구 또는 부품의 표면에 높은 에너지로 충돌할 수 있어서 높은 밀착력을 가진 코팅막을 형성하게 된다. 실리콘발저스코팅의 BALINIT[®] Futura Nano (TiAlN) 코팅에 이 공정을 사용한다.

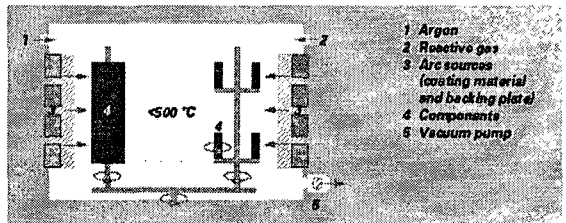


Fig. 6(d) Arc evaporation

PACVD 공정의 기본 구성은 먼저 스퍼터링과 비슷한 방법으로 얇은 금속 밀착층을 형성시킨 후 고주파의 AC 전압을 인가한다. 그리고 챔버 내를 다시 진공화시켜 활성 가스인 아세틸렌 가스를 주입하면 탄소와 수소 원자로 분리되어 공구 또는 부품의 표면에 높은 밀도로 코팅된다. 전압의 세기를 조정함으로써 코팅의 특성을 조정할 수 있다. 실리콘발저스코팅에서는 PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition)를 이용하여 고순도의 BALINIT[®]DLC 코팅을 제공하고 있다.

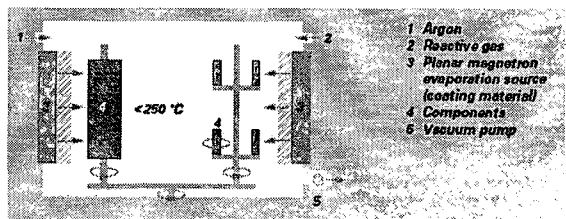


Fig. 6(e) PACVD process

3.3 Hard coatings의 분류와 명칭

지금까지 여러 종류의 PVD, PACVD 공정을 소개하였다. 이러한 코팅은 크게 세 그룹으로 나눌 수 있다. 첫 번째 그룹은 금속과 질소가 결합하는 금속 질화물 코팅(TiN, CrN 및 TiAlN)이며, 두 번째 그룹에는 금속과 탄소가 결합된 카바이드 코팅(TiC, WC 및 NbC)이고, 세 번째 그룹에는 금속을

포함하는 카바이드 코팅(Me-C:H)과 금속을 포함하지 않는 카바이드 코팅(a-C:H)이다. 또 다른 종류로 이 두 그룹이 혼합(TICN)되기도 한다.

Table 2 Nomenclature of carbon coatings

	Schwabe name	Bakers brand	Other names found in the market
Metal-free carbon coatings	a-C:H	BALINIT [®] DLC	DLC (diamond-like carbon) iC (ionic carbon) a-DLC
Metal-containing carbon coatings	Me-C:H	BALINIT [®] C	DLC (diamond-like carbon) Me DLC MeC (metal carbon) iC/Me a-C:H/Me MeCC MeCH
Me-metal (e.g., tungsten, titanium, tantalum)			

3.4 PVD/PACVD 코팅의 특성

PVD/PACVD 코팅은 정밀 부품에 적합하도록 고경도, 우수한 내마모성, 낮은 마찰계수, 우수한 내부식성, 박막 코팅, 정밀한 표면 및 높은 밀착력 등의 특징을 가지고 있다

코팅 두께가 0.5-4 μm인 코팅은 부품의 형태와 치수에 영향을 미치지 않는다. 그리고 빠른 부분의 형상과 표면 조도를 거의 변화시키지 않기 때문에 후처리공정이 필요없다. 즉, 코팅공정이 부품 제조의 최종 공정이 된다. 코팅의 경도와 잔류응력은 최적의 수준으로 관리된다. 증착 온도에 따라 코팅의 미세구조가 변하여 부품의 성능이 변할 수 있기 때문에 온도 제어가 중요하다.

3.5 품질보증을 위한 테스트 방법

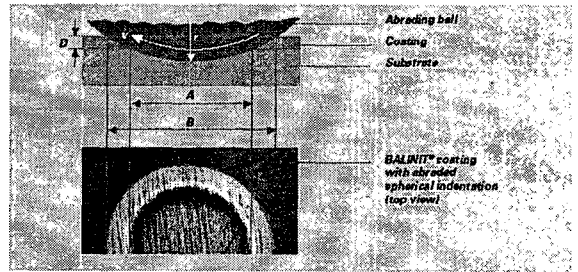
만약 PVD 와 PACVD 코팅 사양이 적용 결정되어 평가된다면, 코팅 품질에 대한 신뢰성과 재현성을 확보하기 위한 표준화된 측정법은 필수적이다

3.5.1 코팅두께 측정

원형 마모 테스트 (spherical abrasion test): 강철 구로 제품의 코팅된 표면을 구형으로 가공하여 코팅의 두께를 계산한다.

X-ray fluorescence (XRF) 테스트: 넓은 영역의 x-ray 스펙트럼을 이용하여 측정하는 것으로, 코팅의 x-ray 의 형광선을 측정하여 코팅 두께를 측정한다.

Fig. 7 Spherical abrasion test



3.5.2 밀착력 시험

로크웰 경도 측정기로 코팅 표면의 압흔을 형

Table 3 Properties and tribological effectiveness

Coating material	BALINIT [®] C		BALINIT [®] DLC	BALINIT [®] C/N	BALINIT [®] D	BALINIT [®] A
	WC/C		a-C:H	CrN	CrN	TiN
Coating type	C1000	C1500				
Typical microhardness (HK 0.01)*	1,000	1,500	> 2,000	1,750	1,750	2,300
Typical coating thickness (μm)	1-4		0.5-3	1-4	1-4	1-4
Increase in surface roughness R _a (μm)*	< 0.02		< 0.02	< 0.02	< 0.2	< 0.03
Coefficient of friction against steel (dry)*	0.1-0.2		0.1-0.2	0.6	0.5	0.4
Coating temperature (°C)	< 250		< 250	< 250	< 500	< 500
Maximum service temperature (°C)*	300		350	700	700	600
Coating colour	anthracite		black	silver-grey	silver-grey	gold-yellow
Protection against abrasive wear	+	++	+++	+	+	++
Protection against adhesive wear	+++	+++	+++	++	++	++
Protection against tribo-oxidation	++	++	++	++	++	++
Protection against surface fatigue	+++	++	++	+	+	+
Protection against corrosion*	++	++	+++	+++	+++	++

Table 4 Test methods for quality assurance

Method	Attribute	Constraints	Precision	Destructive for	
				Coating	Substrate
Spherical abrasion	Coating thickness	Geometry, roughness	0.3 - 0.5 μm	yes	yes
XRF	Coating thickness	Geometry, composition (element)	0.3 - 0.5 μm	no	no
Rockwell hardness (HRC)	Substrate hardness	Substrate hardness Geometry	± 1 HRC	yes	yes
Rockwell test	Coating adhesion	Substrate hardness Geometry	± 0.5 HF-Class	yes	yes
Colour measurement	Colour of the coating	Planar surface	± 1 CIELAB-unit	no	no
Contact stylus profilometer	Roughness	Geometry	*	no	no

성시키고, 광학현미경으로 압흔 주변의 코팅막 박리 및 크랙을 관찰하여 표준화된 6 단계의 기준으로 밀착력을 등급화한다.

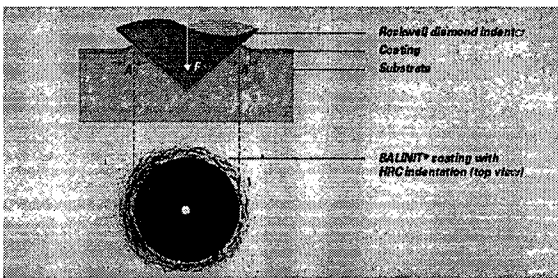


Fig. 8 Use of Rockwell indentation to measure adhesion