

금형 성능향상을 위한 PVD 코팅기술



백 운 승

(KIMM 표면기술연구부)

- '79 - '83 경북대학교 금속공학과(학사)
- '83 - '85 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- '92 - '98 한국과학기술원 재료공학과(박사)
- '85 - 현재 한국기계연구원 선임연구원
- '99. 1 - 현재 엘트론산업 연구원창업(겸직)



권 식 철

(KIMM 표면기술연구부)

- '69 - '73 연세대학교 금속공학과(학사)
- '73 - '75 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- '75 - '80 한국과학기술원 재료공학과(박사)
- '80 - 현재 한국기계연구원 책임연구원



나 종 주

(KIMM 표면기술연구부)

- '82 - '86 서울대학교 금속공학과(학사)
- '86 - '88 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- '91 - '97 한국과학기술원 재료공학과(박사)
- '97 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

물리증착법이라고 불리는 PVD 코팅 법은 주로 진공에서 열원이나 충격원에 의하여 금속 물질을 증발시키고 증발된 물질을 금속이나 세라믹 소지에 코팅하는 것을 말한다. 일반적으로 증발된 물질이 코팅될 때 금속으로 코팅되는 경우는 기능성 박막으로 사용되는 경우를 제외하고는 드물고, 반응가스가 증발금속과 반응하여 세라믹으로 코팅되는 것이 일반적이다.

PVD 코팅은 여러 가지 기술로 나눌 수 있는데 이중에서도 이온플레이팅 기술은 기계산업에 매우 중요한 기여를 하는 중요한 분야이다. 이온플레이팅 기술은 1960년대 초반 Mattox가 2극 이온플레이팅 장치를 개발한 이래 1970년대에는 증발원의 방법과 장치의 개발이 이루어졌고, 1980년대에는 코팅층의 개발과 공정의 다양화가 이루어졌으며, 1990년대에는 응용성의 확대가 이루어지고 있으며 장치도 고급화와 안정화가 이루어지고 있다. 용도 면에서 보면 1970년대와 1980년대에는 주로 장식용 위주로 응용되었고, 일부 절삭공구에의 응용성이 있었다. 1990년대에 코팅층의 종류가 다양해지고 물성의 안정화가 이루어지면서 금형에 응용되기 시작하였고, 코팅층의 잔류응력이 조절되면서 두께를 두껍게 입힐 수 있는 기술이 개발되었고, 하중을 많이 받는 기계류 부품에까지 응용되기 시작하여 많은 부분에서 PVD 코팅에 의한 세라믹 박막코팅은 기계산업에서 없어서는 안될 중요한 기술로 자리 매김을 하고있다. 금형에의 PVD 코팅을 할 경우 일반적으로 다음과 같은 장점을

가지고 있다.

- 1) 내마모성의 향상
- 2) 내식성의 향상, 내약품성, 내산화성, Hot gas에 대한 내식성
- 3) 이형성, 윤활성의 향상 : 스라이딩 부품, 압철 부품에 마모방지
- 4) 길이 정도가 높다. 박막처리 일반적으로 2-4 μ m, 저온처리를 하는 경우에는 변형은 거의 없음.
- 5) 금형 maintenance 향상(Cleaning의 향상, 내구성 향상에 의한 maintenance 빈도 절감으로 인한 생산성이 향상되며, 보수를 할 시기를 판정할 수 있는 척도로 활용하는 것이 용이하다.(TiN : 금색)

여기서는 금형에 적용되는 PVD 기술에 대한 소개와 코팅시 문제점에 대해서 언급하고, 한층 더 나아가 금형에의 PVD 코팅층을 확대하는 방안 대해서도 언급하고자 한다.

2. 금형 코팅을 위한 물리증착법(PVD)

물리증착기술은 진공증착, 스퍼터링, 이온플레이팅 등의 3가지 종류로 나눈다. 금형에 코팅이 가능한 방법은 스퍼터링 기술과 이온플레이팅 기술인데 이온플레이팅이 밀착력이 우수하고, 밀도가 높기 때문에 이온플레이팅 기술을 선호하고 있다. 이온플레이팅 기술은 10^{-4} - 10^{-2} Torr의 감압하에서 증발금속을 이온화시켜 금형의 표면에 증착시키는 기술을 말한다. 금속의 증발 방법에 따라 저항가열법, 전자빔법, HCD법, 아크 이온플레이팅법 등으로 나누어진다. 지금까지 금형에 사용하여 성공을 거두고 현재 사용하고 있는 코팅방법은 아크 이온플레이팅법과 아크와 HCD를 혼합하여 사용하는 방법이다. 이들의 코팅방법은 증착온도가 200 $^{\circ}$ C에서 500 $^{\circ}$ C로 낮아 열응력과 변형이 일어나지 않으며, 강재의 경우 tempering 이 동시에 처리가 가능하다. 또한 소재의 종류에

관계없이 피복이 가능하기 때문에 알루미늄 합금 등 저융점 금속에도 코팅이 가능하다.

2.1 아크 이온플레이팅 기술

아크 이온플레이팅 기술 중에서 타겟을 여러 개 사용하기 때문에 멀티 아크 이온플레이팅이라고 불리어지는 코팅법이 1970년에 러시아에서 개발되어 미국, 유럽, 한국, 중국, 일본 등지의 여러 나라에서 많이 사용하고 있다. 금속 타겟을 수냉하고 그 뒷면에 자석을 배치한 다음 진공용기를 양극으로 하고 타겟을 음극으로 하여 전압을 가하여 타겟 표면에 진공 음극 방전이 시작한다. 아크 방전은 아크의 스팟에서 이루어지게 되는데 금속이 증발하고, 이온화하여 플라즈마 상태로 방전이 일어나게 된다.

그림 1은 멀티 아크 이온플레이팅 장치의 개략도를 나타낸 것으로써, 다음과 같은 특징을 갖는다. 타겟의 수를 많이 배치할 수 있고, 따라서 진공용기의 크기도 크게 할 수 있기 때문에 큰 제품의 처리나 많은 양을 장입할 수 있어 생산성이 좋다. 진공용기의 중앙에는 증발원을 설치할 필요가 없기 때문에 금형과 같이 큰 제품의 처리에 적당하다. 밀착력과 품질이 우수한 피복

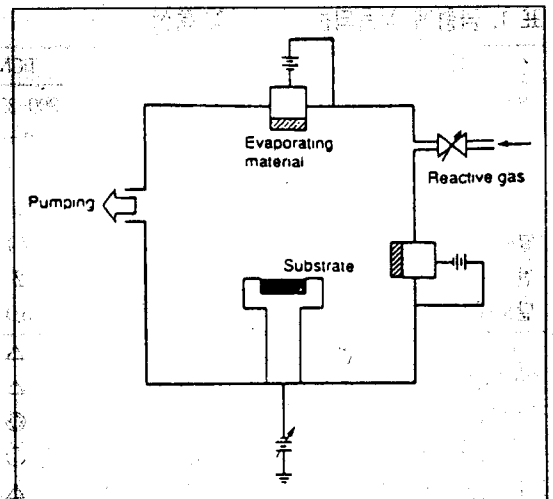


그림 1. 아크 이온 증착 장치 개략도

층을 얻을 수 있고, 유지관리가 용이하다. 또한 이온화률이 높고(80%) 또한 처리온도가 낮고, 타겟에 각각 다른 금속을 배치함으로써 다층 피복을 코팅하는 것이 가능하며, 공정관리가 용이하다.

2.2 HCD/ 아크 이온플레이팅 기술

HCD 방전 현상을 이용하여 얻어진 저전압, 고전류(300-600A) 전자빔을 이용하여 타겟금속을 용해하여 증발시키고 이온화하여 금형 등의 처리물 표면에 증착시키는 방법이다. 증발물이 고체 상태에서 용해하여 기화하는 공정을 거치기 때문에 증발원은 항상 진공용기의 아랫면에 설치하여야 하므로 대형 금형에 코팅하는 것에는 한계가 있다. 아크 이온플레이팅은 droplet이 코팅되는 반면 증발과 기화에 의해 코팅이 일어나기 때문에 박막이 균일한 특성을 지니고 있는 것이 특징이다. 그러나 이 방법은 코팅층의 밀착력이 비교적 낮고 불균일하므로 금형에 적용하는 것은 문제가 될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 그림 2에 나타난 것과 같이 초기에는 아크 이온플레이팅에 의한 밀착력 향상을 위한 코팅이 이루어지고, 그 뒤 HCD 증발원에 의해 표면이

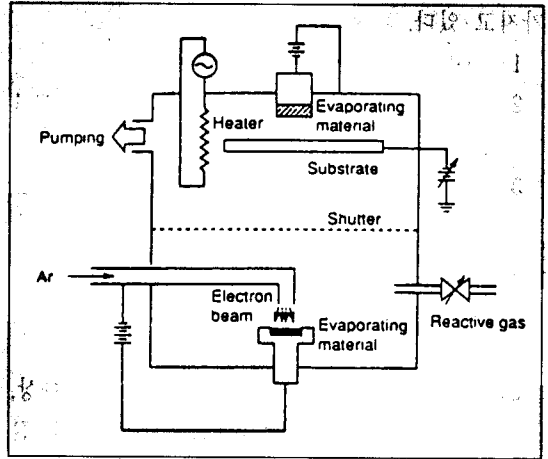


그림 2. HCD/아크 이온 증착 장치 개략도

고온 코팅층을 형성시키는 기술도 금형의 내마모 코팅을 위해 개발되어 있다.

3. 코팅층의 종류 및 특성

각 코팅층의 특성을 표 1에 나타내었다. 코팅층은 코팅 온도가 500°C 이하에서 이루어지는데 온도가 올라가면 소지의 경도 저하가 발생되게 되며, 소지의 변형이 발생하게 된다. 아크 이온플레이팅 등 PVD로 코팅할 수 있는 코팅층의 종류와 그 특징에 대해서 살펴보고자 한다.

표 1. 금형에 적용되는 코팅재의 특성

특성/피복재	TiN	TiCN	CrN	VC	TiAlN
경도 (HV)	200-2400	300-3500	200-230	2800	2300-2500
마찰계수	0.3-0.4	0.2-0.5	0.5		0.40
내열성 (°C)	550-600	450-500	~700	600	800
열전도도 25°C (Wm ⁻¹ k ⁻¹)	19	36	21	10	-
열팽창계수 25°C (10 ⁻⁶ k ⁻¹)	9.4	7.4	12	6.7	-
전기저항 25°C (10 ⁻⁵ Ωcm)	255	2	-84	59	-
밀도 (g/cm ³)	5.2	5.0	6.5	5.5	-
부식저항	○	△	◎	○	◎
산화저항	○	△	○	○	○
마모저항	○	◎	◎	◎	◎
소착저항	○	○	◎	○	○
충격저항	◎	△	○	○	○

* 특성크기 △ < ○ < ◎

3.1 TiN 코팅층의 특징

가장 만능적으로 사용되고 있는 코팅층이며, 보편화가 되어 있기 때문에 단가가 낮은 특징을 가지고 있다. 철강재료의 일반적인 절삭공구, 프레스 금형, 냉간 단조금형, 플라스틱 성형금형, 정밀한 표면조질을 얻고자 하는 Material flow의 경우, 다이캐스팅 금형에 많이 사용되고 있는 코팅층이다. 이 코팅층은 황금색이며 내마모성이 우수하기 때문에 많이 사용되고 있으며 여러 가지 개발된 코팅층 중에 대표적인 코팅층으로 자리를 잡고 있다.

3.2 TiCN 코팅층의 특징

TiCN 코팅층은 프레스 가공, 냉간 단조가공 분야에 있어서 TiN 코팅층보다 우수한 특징을 가지고 있다. 고경도, 저마찰계수를 갖는 특징이 마모의 기구에 대단히 유리하게 작용하기 때문에 프레스 금형과 냉간 단조금형의 적용에 유리한 것으로 보고하고 있다.

3.3 CrN 코팅층의 특징

고온에서의 화학적인 안정성을 가지고 있다. 대기중에서 약 700°C 이상에서도 화학적인 안정성을 유지하고 있다. 용융상태의 금속과 접촉하는 경우에도 화학적으로 합금화가 일어나지 않기 때문에 다이캐스팅 금형과 같은 금형에서 유리하다. 우수한 밀착성, 내히트체크성 열간공구강과의 열팽창계수의 차이가 적은 특징을 가지고 있고, 화학적으로 염소계와 붕소계에 대해서 높은 내식성, 기계적인 마모가 있는 경우에서의 높은 내식성을 가지고 있다. TiN과 CrN 코팅은 고온용해 시킨 아연이나 알루미늄에 대해 화학적으로 안정하다. 코팅층과 용해 금속과의 반응이 일어나는 경우는 없다. 다이캐스팅 가공, 온간 성형, Monel 합금(Ni-Cu 합금)의 기계가공, 동관의 압출가공,

티타늄의 냉간 성형가공, 유리 성형가공 등에 적합한 코팅층이다.

3.4 TiAlN 코팅층의 특징

Ti, Al 금속을 함유하고 질소가 들어가 있는 세라믹 박막의 대표적인 박막이다. Ti과 Al 금속의 증발은 아크 이온플레이팅에 의해 이루어지고 질소가스를 장입하여 TiAlN 박막을 만든다. TiAlN 박막을 코팅하는 동안 Ti과 Al 타겟을 분리해서 증발시키는 방법과 TiAl 합금타겟을 사용하는 방법이 있으나 각각 장점과 단점이 있다. 분리형 타겟을 사용하는 경우에는 TiN 박막을 코팅하고 난 뒤 TiN과 AlN 조성을 점차 다르게 할 수 있어 gradient 하게 박막을 코팅할 수 있어 하나의 장점이 될 수 있다. 그러나 분리형 타겟을 사용하는 경우에는 Al 타겟을 사용하는 동안 아크가 진행하면서 굵은 덩어리가 표면에 코팅되어 박막의 조도를 나쁘게 하는 원인이 되기도 한다. 합금타겟을 사용하는 경우에는 Droplet가 줄어드는 것은 장점이나 gradient 박막을 얻기가 힘들고 합금의 조성이 고정되어 있는 것이 단점이다. 지금까지 코팅되는 합금의 조성은 주로 30%~50%의 Al이 혼합되는 것이 일반적이다.

TiAlN 박막은 경도가 3,500Hv 정도로 매우 높고, 내열성과 내산화성이 우수하여 고온에서 제품을 만드는 작업에 합당한 세라믹 코팅층이다. 이러한 내열성은 TiAlN 박막 중에 혼합되어 있는 Al 성분이 산화하여 Al_2O_3 박막을 형성하기 때문이다. TiAlN 박막은 이러한 내열성을 응용하여 열간금형과 경도가 높은 특성을 이용하여 프레스 금형에 합당하리라 생각된다.

4. 금형에 적용을 위한 코팅층의 밀착력 향상

금형에 적용하기 위해서는 코팅층의 밀착력이

매우 중요한 요인이다. 코팅층의 밀착력을 향상하기 위한 방안으로서 여러 가지 방안들이 소개되고 있고 많은 부분 현재 코팅공정에서 사용되고 있다.

코팅층과 소지의 이상적인 결합은 물리적으로 강하고, 사용되는 동안에 시효 약화되는 일이 없는 경우이다. 계면구조를 잘 설계하여 반복되는 하중, 충격, 마모 등에 잘 견딜 수 있어야 한다. 이러한 충격과 마모는, 코팅층과 소지의 계면에서 직접적으로 떨어지게 하는 힘을 가할 수도 있고, 코팅층과 소지의 열팽창계수의 차이로 열응력을 가하여 파괴가 일어나는 경우도 있을 수 있다. 또한 화학적으로 부식을 일으키는 유체가 계면에 침투할 수도 있는데, 이러한 환경에서도 잘 견딜 수 있는 계면구조로 설계해야 실용화가 가능하다. 코팅층의 밀착력은 박막과 모재 사이의 계면구조에 의해서 결정되므로, 계면구조와 연관하여 설명할 수밖에 없다. 계면 밀착파괴 모드는 계면에서 파괴가 시작되어 전파되는 것으로 볼 수 있기 때문에 계면에서 파괴가 시작되는 것과 전파되는 것을 막기 위해 계면구조의 설계가 필수적이다. 밀착력 향상을 위한 계면구조 설계의 여러 가지 방법이 다음과 같이 소개될 수 있다.

4.1 이온빔을 이용한 밀착력의 향상

이온빔 기술이 박막 증착의 밀착력 향상기술로 효과와 경제적인 가치에 대해서 다각도로 검토되고 있다. 연구결과는 밀착력 향상기술로 희망적이며, 중요성이 최근에 부각되고 있다. 낮은 에너지의 Kaufman 이온 source에 의한 이온빔 장치를 진공코팅장치에 부착하여 TiN 등의 박막 밀착력 향상에 응용하고 있다. 이온빔 source에 의한 박막의 계면구조 설계에 있어서 중요한 공정으로 될 것으로 보인다. 이온을 이용한 공정을 처리할 때 그림 3에 나타난 것과 같이 다음의 효과가 나타나기 때문에 밀착력을 향상시킬 수

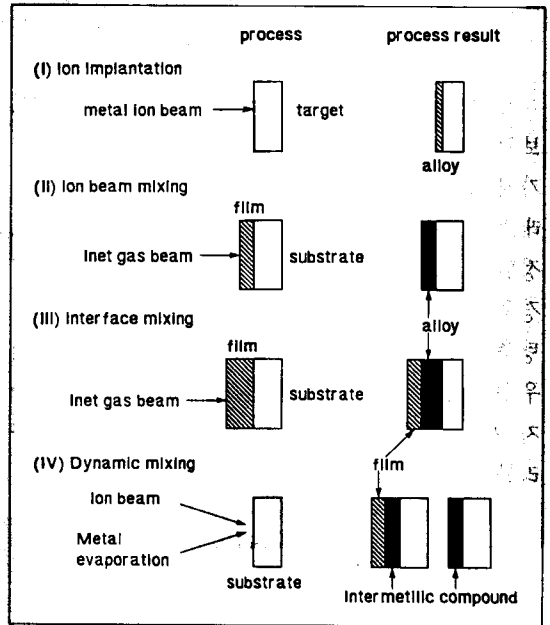


그림 3. 이온충격시 나타나는 여러가지 현상

있다. 1) 증발원에 코팅한 물질을 이온조사하여 코팅층을 합금화시키는 이온빔 mixing 효과, 2) 기판과 코팅층의 계면에 합금을 만들어 주는 계면 mixing 효과, 3) 기판에서 증착과 이온조사를 동시에 일어나게 하는 다이내믹 mixing 효과, 4) 다이내믹 mixing과 유사하나 다이내믹 mixing에 비교해서 이온에너지가 낮고, mixing 효과가 적지만, 피막의 축적밀도의 향상과 내부응력의 완화 등의 효과가 있는 이온빔 assisted 증발법 등이 있고, 이들의 혼합기구로 밀착력을 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 이온주입에 의한 박막 밀착력의 향상을 위해 여러 가지 방법을 이용하는데, 주된 기구는 기판과 코팅층의 계면 자유에너지, γ_{AB} 를 낮추는 것이다.

이온빔에 의해 박막 밀착력 향상시키는 예는 여러 가지가 있다. 순철과 STS 304 기판에 Ti 이온과 N 이온을 이온주입하고, Ti 중간층을 증착하고, TiN을 코팅하면, 밀착력을 증가시킬 수 있게 된다. Ti 이온을 이온 주입하여 얻어진 밀착력 향상은, 이온주입으로 소재표면에서 Ti 탄화물이 형성되고, 탄화물의 형성으로 밀착력을

향상시킬수 있다고 하였다. 한편 N을 이온주입할 때 밀착성의 개선은 계면근처에서 TiC, Ti(C,N), Ti(C,N,O)등의 화학적 조성이 새로 생성되었거나, 결합상태의 변화가 있어 천이화합물의 생성, 기판표면에서 Fe₂O₃, FeO, Cr₂O₃ 등의 산화물이 분해되어 Ti 산화물과 질화물로 변화되는 것, OH기가 적은 표면이 출현하는 것 등에 의해 이루어지고 있는 것으로 추론하고 있다. OH기 등의 오염물질을 제거하는 것이 밀착력의 향상에 중요한 역할을 할 것으로 생각하고 있다.

4.2 기판 전처리

증착 전처리를 낮은 에너지 (500eV)로 시편에 Ar⁺ 이온으로 전처리하게 되면 코팅층의 밀착력은 증가하게 된다. 이러한 ion beam 기술의 밀착력의 향상의 원인은 다음과 같은 것이 있는 것으로 사료된다. 1)모재의 표면에 존재하는 불순물의 제거, 2) 화합물 시편의 경우 표면에 존재하는 결합을 끊어 물질이 증착될 때 결합할 수 있도록 dangling bond를 만들어 주는 것, 3) 화합물 시편의 경우, 증착이 될 때, 최적의 조성을 얻는 복합 결합 처리를 제공하는 표면 상태를 유지, 4) 표면의 거칠기를 증대시켜, 새로 형성되는 표면적을 넓게 해주는 효과 등이 있을 것으로 사료된다.

기판을 탈지 전처리할 때 STS304 시편의 경우 acetone이나 trichloroethylene 등의 유기정제 중에서 초음파로 세정을 행하는 것으로 충분하지만, HSS나 SKD 등의 강종에서는 모재의 표면에 존재하는 산화물을 제거하기 위해 산세로 처리하는 방법 등이 있다.

4.3 중간층의 이용

TiN 코팅층을 피복할 때 소지와 TiN 사이에 중간층으로 Ti를 피복하는 것이 공구의 수명향

상을 위해 필수적인 공정으로 되어 있다. Ti층의 역할에 대해서는 잘 알려져 있지 않지만, 역할도 피복조건에 따라서 다르고, 또한 최적의 두께는 앞에서 언급한 어떤 효과를 기대하느냐에 따라서 다를 것으로 생각되지만, 대부분의 경우 0.1 μm-0.2 μm 정도라고 알려져 있다. Van Stappen 등은 3극관식 이온플레이팅 장치를 이용하여 TiN 박막을 형성하여 밀착력을 스크래치 시험으로 관찰하였는데 이들에 의하면 중간층의 두께가 두꺼워질수록 계면에서 취화되는 결과를 얻어 밀착력이 나쁜 연구결과를 얻었다. Erdemir 등은 100-500°C에서 공구강(M50)에 대하여 0.1 μm 두께의 Ti 중간층과 TiN 코팅층을 HCD법으로 이온플레이팅하여, 계면을 투과전자현미경으로 관찰하고 계면구조를 모델로 제시하고 있다.(그림 4) 온도를 100°C로 낮게 한 경우 α-Ti 기판에 접한 곳에는 입계가 뚜렷하지 않은 결정체가 존재하며, 박막이 성장하면서 큰 입계가 분산된 Ti 층이 존재하며, 온도를 300°C로 올릴 경우 기판에 존재하는 탄소가 확산하여 TiC(grain size : 70nm)와 조대한 α-Ti가 혼합된 중간층이 형성되며, 500°C로 온도가 증가한 경우에는 완전한 TiC 단일층이 형성한다.

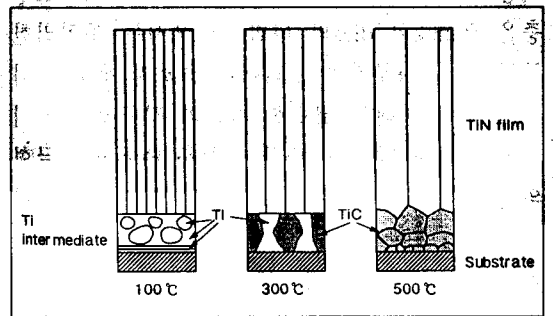


그림 4. Schematic diagram of the change in Ti intermediate layer with the temperature

Ti 중간층을 코팅하고 TiN을 100°C에서 코팅하면 중간층 없이 500°C에서 TiN을 코팅한 경우보다 밀착력이 높았다. Ti 중간층이 있는 코팅층을 TiC 생성가능성이 있는 온도인 500°C에서 열

처리하면 밀착성을 크게 개선할 수 있는 것과 Ti 중간층이 존재하는 경우 기판과 코팅층 계면에서 응력을 완화시키고, 기판에서부터 유입되는 탄소 원소와의 반응에 의해 TiC 생성과 같은 화학적인 계면반응으로 밀착력을 향상시킬 수 있다고 결론을 짓고 있다.

5. 금형에의 PVD 코팅층 응용 사례

5.1 프레스 가공, 냉간단조가공

박판의 강판을 프레스 가공을 하는 경우에는 프레스 금형의 수명이 짧아 하루에 2회 생산을 중단하여야 하였는데 동일한 가공의 조건으로 TiN 박막을 코팅한 경우에는 냉간용착이 완전히 일어나지 않았고, 수명이 10배 이상 향상되는 결과를 가져오게 되었다. 공구 마모의 저하로 인하여 재연삭하여 사용할 수 있는 횟수가 2배 이상으로 증가되게 되었다. 또한 공구를 교환하는데 시간이 75%가 단축되는 결과를 가져오게 되었다.

타발가공에 의한 금형은 단속적인 조건에서 사용되기 때문에 절삭가공과 한가지로 PVD법을 적용하여야 한다. 아크 코팅법에 의한 TiN 코팅층은 Punch와 dies의 타발 test에서는 무처리한 부품은 corner부가 마모되어 사용하지 못하게 되는 부품에 비해서 코팅한 제품의 경우에는 거의 마모가 되지 않는다. 또한 성형용 Punch류 금형의 경우에는 종래에는 CVD법이 주로 사용되었지만 그림 5에서 보여주는 것과 같이 PVD법이 많이 이용되고 있는데 이러한 이유는 최근의 정밀도의 요구도 높아지기 때문에 처리중 변형이 없는 PVD 코팅법이 많이 이용되고 있기 때문이다. 즉, CVD법에 의해 코팅하면 CVD 코팅을 하고 난 뒤 후처리에 의해 변형과 비뚤어짐 현상이 나타나기 때문에 고정밀도의 금형을 유지할 수 없기 때문이다. 따라서 내마모성이 다소 열세인 PVD법을 적용하려고 하는 경향이 있다. 또

한 성형용 펀치의 수명이 나쁜 경우에는 PVD 방향으로 가고 있고, 자동차를 생산하는 Press 금형의 일부가 PVD 처리에 의해 좋은 성과를 거두고 있다. 일례로 전조용 Rack 공구에 아크 이온플레이팅에 의한 TiN 코팅처리를 행하고, 평균 3-4배의 수명향상 효과를 거두고 있다. 앞으로도 계속 많이 PVD 법이 프레스 금형에의 적용이 확대될 것으로 예상되고 있다.

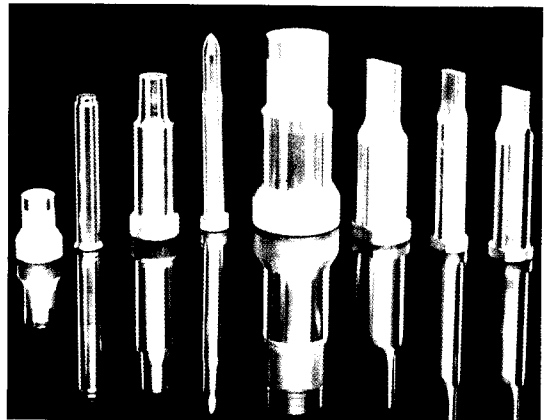


그림 5. TiN 코팅된 다이스와 펀치

5.2 Deep drawing 가공

TiN/TiCN 박막이 코팅된 금형이 많이 사용되고 있다. Deep drawing 공구의 수명을 7배 개선하는 결과를 가져오게 되었다. 판의 두께가 2mm의 고풍장력강으로부터 가공하는 경우에는 가공개시 약 40,000 스트로크에 락 모양의 스크레치가 발생하게 된다. 여기서 공구의 끝면과의 냉간용착이 발생하게 되어 제품을 불량품으로 되게 된다. 최초로 적용한 TiN 코팅층에 의해 공구의 수명이 4-5배 증가되면서 최초 불량품이 발생할 때까지 200,000 스트로크까지 연장되게 되었다. TiCN 코팅은 그 수명을 약 50% 연장하여 당초보다 7배나 향상하게 되었다. Deep drawing 공구의 전수명기간 동안을 통하여 가공이 안정되었고, 불량품의 발생이 근절되었다. 공구수명의 개선에 의해 시간이 단축되었다. 특히

기계의 가동률이 향상되었다. 이 공구의 재코팅은 통상 2회까지 가능한 것으로 보고되고 있다. 공구의 보수비용이 절감되는 큰 효과를 볼 것이라고 추정된다.

5.3 승용차 서스펜션 압 가공

효과 : 공구수명을 87배나 개선하였다. 르노사에서 파링은 극히 복잡한 가공이므로 정해진 임계이상의 하중으로 가공을 하는 경우에는 소재 강판의 탄성한계를 넘어서면서 microcrack이나 변형이 나타나는 경우가 있다. 표 2에 나타낸 것과 같이 이 경우에 TiN 박막을 적용한 결과 이온질화를 한 경우가 60,000개 타발하는 수명을 크게 초월하여 175,000개의 부품을 생산하여 승용차의 생산대수인 200,000개 까지 생산할 수 있어 업계에서는 만족하고 있다. 여기에 고경도의 TiCN 코팅층과 비교하면 최종적으로 876,000개의 제품을 생산할 수 있는 공구수명에 도달할 수 있어, 분당 16개의 제품생산을 달성할 수 있었다.

표 2. 공구수명의 비교(공구재질 : SKH 51종)

처리 종류	공구 수명(개)
무처리	10,000
이온질화	60,000
TiN 코팅층	175,000
TiCN 코팅층	876,000

□ TiCN 코팅층의 효과

- Crack 발생의 해소
- 가공품의 조도향상(Rz 2.8µm 이하)
- 반경방향의 비틀어짐 현상 감소
- 구멍이 있는 경우에는 구멍의 평행도 향상
- 불량률의 감소
- 기계정지 시간의 단축

5.4 냉간 압출가공(승용차 엔진 재료 분사)

절삭가공에 의한 엔진 부품을 가공하는 경우

에는 가공시간이 길고 비용이 많이 들어간다. 냉간압출에 의한 가공을 하는 경우에는 부품과 금형간의 모재 융착으로 실현되지 못하였다. 현재에는 고경도(Hv 2,300)의 TiN 코팅공구가 적용된 이래 생산성의 급격한 증가와 비용 절감으로 인하여 냉간 압출에 의해 제품이 생산되고 있는데 표면의 품질을 확실히 보장하고 있다. 사용재료로는 봉재와 코일 형태 등이 있고, 가공시간을 크게 단축하는 등 절삭가공으로 생산되는 것과 비교해 재료비의 절감은 약 70%에 해당되는 것으로 되어 있다.

5.5 다이캐스팅 가공

5.5.1 Al 다이캐스팅 금형

생산성의 향상을 기할 수 있다. TiN 코팅을 적용하여 다이캐스팅 금형의 성능과 생산성의 향상을 가져올 수 있었다. 기계의 정지 시간의 억제를 기할 수 있었다. 또한 TiN 코팅층을 다이캐스팅 금형에 적용함으로써 이형체의 사용량을 획기적으로 줄일 수 있었다. 최근의 통계에 의하면 직접비의 감소는 대략 45%를 줄일 수 있는 것으로 되어 있다. 생산단가의 비교를 표 3에 나타내었다.

표 3. 다이캐스팅 금형의 생산 cost 비교

	종래의 금형	코팅 금형
가격(단위 : 10 \$)	7,800	8,950
수명(숫트수)	150,000	250,000
숫트당 단가(1/100 \$)	52	36

5.5.2 아연 다이캐스팅 금형에의 PVD 코팅 적용에 TiN/CrN 코팅금형, 효과 : 생산성의 향상이 가공에 있어서는 CrN 코팅층의 효과는 TiN 코팅층을 훨씬 능가하는 것으로 되어 있다. 코팅된 다이캐스팅 금형과 코팅되지 않은 금형을 비교하였다.

코팅되지 않은 금형

- 용해금속과의 합금화 반응에 의해 슬라이딩, 슬라이딩 코아의 파손
- 제품의 점착 고착 및 제품의 손상에 의한 불량률의 증대
- 슬라이딩 코아의 크리닝과 보수작업을 위한 정지시간의 증대

코팅 금형

- 수명의 증대
 - 비코팅 : 15-20만 샷트
 - TiN 코팅 : 40 만 샷트
 - CrN 코팅 : 110 만 샷트
- 이형성의 향상과 Cycle time의 안정
- 제품표면품질의 개선에 의한 불량률의 감소
- 공구 cost 및 보수 cost의 감소
- 생산성의 향상
- 클리닝 빈도의 축소, 슬라이딩 코아의 클리닝의 용이성 및 신속성

5.6 플라스틱 금형에의 적용(그림 6)

최근에는 플라스틱 금형에 PVD에 의한 TiN

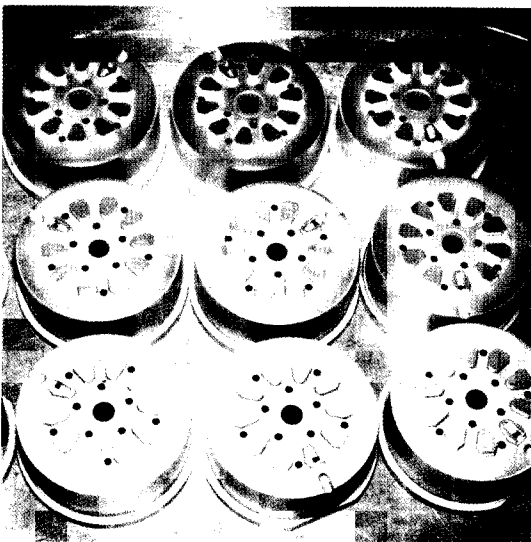


그림 6. TiN 코팅된 플라스틱 금형

코팅을 한 결과 수명이 크게 향상되고 있다. 사출성형기용 스크류 금형에 적용하여 미처리한 금형에 비해 크게 향상되는 결과를 얻게 되었다. 처음에는 길이가 길고 제품의 무게가 많이 나가기 때문에 밀착불량 등에 의해 불량율이 많이 생겨 어려움을 겪었으나 현재 밀착력이 우수한 코팅층을 얻을 수 있다. TiN 코팅한 스크류를 이용하면 수지의 이형성이 좋고, 수지가 타는 현상이 줄어들어 User로부터 좋은 평가를 받고 있다. 또한 몰드 코아에 PVD 법에 의한 TiN 코팅 처리를 한 것은 코팅처리하지 않은 것에 비해 약 3배이상의 수명 연장이 보고되고 있다. 플라스틱 금형의 수명 연장은 확실히 이루어질 것으로 확신한다.

6. PVD와 기타 코팅방법과의 비교

지금까지 PVD에 의한 TiN 등의 경질박막코팅은 주로 절삭공구등의 고속도 공구강에 주로 사용되어 왔다. 표면처리법으로서는 CVD법이 오래되고 1960년대부터 초경공구의 팁에 코팅되어 공구의 수명을 크게 연장하여 왔다. 그러나 CVD법에 의한 TiN 코팅층은 내충격성이 약하고 단속절삭 등의 조건에서는 칩핑 등이 발생하기 쉬운 결함을 가지고 있다. 그래서 이 결점을 해소하기 위해서 공구강의 Tempering 온도이하에서 처리가 가능한 PVD 법이 개발되어 1980년대부터 실용화되기 시작하였다.

금형의 경우에도 당초에는 CVD 법이 적용되어 왔다. 특히 Punch 류 등의 냉간 단조금형에 대부분 적용되고 있다. 그렇지만 CVD 법은 공구강의 변태온도 이상의 고온에서 처리가 되기 때문에 그 후 후공정에서 진공소입 소려를 행할 필요가 있다. 이것 때문에 변형과 비틀어짐이 발생하고 고정밀도를 요구하는 금형에는 문제가 되고 있다. 이것에 비해 PVD 법은 완전히 변형을 잡고 비틀어짐이 생성되지 않지만 코팅층의 밀착력이 감소한다는 단점이 있다. 이 결점을 해

결하기 위해 아크 법이 개발되어 금형에 적용되고 있다.

7. 금형의 표면요구 특성

금형에는 냉간 프레스금형, 냉간단조용금형, 열간단조용 금형, 다이캐스팅 금형, 플라스틱 금형 등이 있고, 그 각각이 요구하는 특성이 다른데 아래의 표 4에 나타낸 것과 같다.

□ 표면처리특성의 비교

각종의 표면처리법에 의해 공구강 (SKH51, SKD61, SKD11종)을 처리한 것의 제특성을 평가한 결과를 표에 정리하여 나타낸 것과 같다. 주요한 코팅층의 마모특성과 heat check 특성을 표 5에 나타낸 것과 같다.

표에서 나타낸 것과 같이 내 heat check 특성, 피로강도 등의 특성에서 우수하지만 밀착력이 CVD 법에 비교해서 조금 감소하고 있다. 그러나 이 부착력도 새로운 방법이 개발되기 시작하면서 밀착력이 향상되어 PVD 법이 금형에의

적용범위가 확장되고 있다. 특히 TD 처리에 의한 코팅법이 많이 PVD법으로 대체될 것으로 생각된다.

8. 고하중 금형에 적용을 위한 Duplex coating 기술

TiN 경질박막을 코팅하기 위한 소재로 사용하는 경우, TiN 박막은 경도가 비커스 값으로 2,500 Hv 정도이나 열처리된 하지의 경도 값은 600 Hv 이하로 차이가 많이 난다. 이러한 경우에는 코팅층을 두껍게 코팅하여 하중이 하지가 지 전달되지 못하도록 하는 방법이 있을 수 있지만, TiN 코팅을 위한 PVD는 코팅속도가 비교적 느리기 때문에 코팅층의 두께를 두껍게 하는 것이 시간이 많이 걸릴 뿐만 아니라, 또한 두께가 두꺼워지면서 코팅층의 residual stress가 커지기 때문에 충격하중이나 반복하중에 의해 사용되는 도중 피로마모(fatigue wear)가 발생하게 되어 성능과 수명을 다하게 된다. 피로마모를 해결하기 위한 다른 코팅 방법으로 duplex coating 처리를 한다. Duplex coating층은 코팅층과 하지

표 4. 각 금형의 요구 특성

	내마모성	내소부성	내 Heat check성	내식성	피로강도
냉간프레스금형	○	○			△
냉간단조용금형	○	○			△
열간단조용금형	○	○	○		△
다이캐스팅금형	○	○	○		
플라스틱 금형	○	○	△		

표 5. 금형의 표면처리에 요구되는 중요한 특성

	내마모성	내소부성	내 Heat check성	내식성	피로강도
PVD법	○	○	◎	○	○
CVD법	◎	○	△	○	×
TD 처리법	◎	○	△	○	×
이온질화법	×	×	×		○
염욕질화	×	×	×		△
보론처리	◎	○	×		×

사이의 경도 차이를 줄일 수 있어 저합금강에 적용하는 것이 가능할 뿐만 아니라, 코팅층의 두께제어를 정밀하게 해줄 수 있는 장점이 있는 방법이다.

Duplex coating은 이온질화 처리를 하여 질화층의 깊이를 약 50 μm 에서 2,000 μm 까지 질소를 확산시켜 경도가 높은 층을 두껍게 만들고, 그 위에 경도가 높은 TiN 세라믹 경질 박막을 1 μm 에서 10 μm 까지 코팅하여 피로강도와 내마모, 마찰의 기능을 동시에 부여하는 것을 말한다. 저합금강에서 이온질화층의 대표적인 특징은 경도가 높은 두꺼운 층(화합물층과 확산층으로 구분)과, 인성이 강한 중앙부위, 피로 한계의 상승, 접촉피로의 성능 개선 등 피로와 관계된 물성이 우수한 특성을 갖고 있다. PVD 경질박막 코팅의 경우에 있어서는, 질화층에 비해 높은 경도 값과 질화층에 비해 얇은 두께, 높은 트라이블로지 특성, 내화학성, 내열성이 우수한 것이 특징이다.

그림 7에서 언급한 것과 같이 duplex coating은 이온질화와 PVD 코팅층의 장점을 선택한 것인데, 대표적인 특징으로 표면에서의 높은 경도와 깊이가 깊고, 중앙에서는 인성이 높은 특성을

지니고 있는 복합재료이다. 피로마모가 문제가 되고 있는 기계부품에 있어서는 duplex coating 기술은 필수적이다.

질화는 소재에 활성화된 질소를 확산시켜 질화층을 만들기 때문에 공정시간이 많이 필요하며, 일반적으로 공정시간이 수 시간에서 수십 시간동안 처리한다. 또 다른 이온질화의 특징은 대용량의 chamber에서 많은 시편을 장입하고, 질소 원소를 확산에 의해 침투시키게 되므로 장시간 처리하는 것이 필요하게 된다. 반면 TiN 코팅을 위한 PVD 코팅은 증발원 및 시편 holder, 바이어스 전원공급장치 등으로 복잡하게 구성되며, 용기의 크기에 따라 TiN 코팅층의 물성이 균일하지 못하므로 균일한 물성을 유지하기 위하여 일반적으로 chamber가 작다. 또 다른 이온 플레이팅의 특징으로 코팅속도가 낮고, 코팅층이 두꺼워지면서 residual stress가 크게 걸리게 되므로, 코팅층의 두께를 얇게 코팅하는 부품에서만 사용되어 공정시간이 짧은 것이 특징이다. 위에서 언급한 공정상의 특징으로 인하여 duplex coating은 이온질화를 수행한 다음, TiN 코팅은 PVD 장비로 이송하여 코팅을 수행한다.

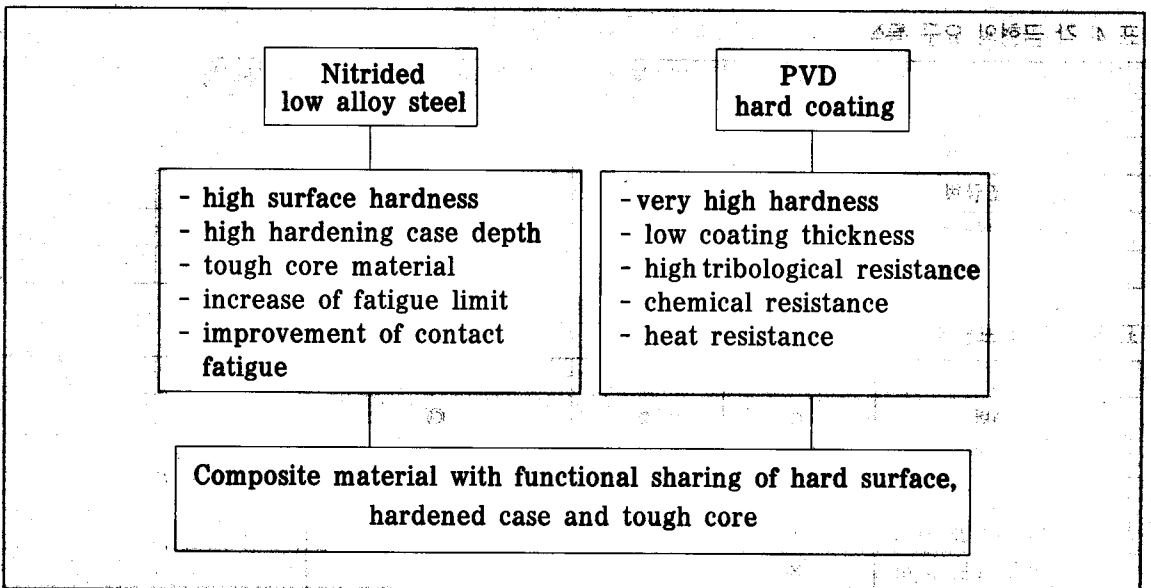


그림 7. Duplex coating의 장점

Duplex coating은 질화를 하고 난 뒤, PVD chamber로 이송하는 동안 소지를 대기 중에 노출하여야 한다. 노출하는 동안 질화층의 표면에서 국부적인 표면 산화나 유기물이 흡착되어 duplex coating층의 상부층인 TiN의 밀착력을 약화시키게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 표면의 산화물과 흡착된 유기물을 제거하여야 한다. 국부적인 산화나 유기물의 흡착은 산세나 탈지 등의 방법으로 제거할 수 있으나, 완전하게 제거되지 않고, 제거된다 하더라도 처리 후 chamber로 이동하는 동안 산화가 되거나 유기물이 흡착될 수 있어 코팅 직전에 시편을 이온 bombardment 방법으로 iron nitride의 표면을 cleaning하는 것이 필수적이다. 이온 bombardment에 의해서 iron nitride의 표면을 cleaning하면 산화물, 유기물 등의 이물질을 제거할 수 있다.

Duplex coating층의 밀착력을 증가시키기 위하여 박막과 하지 사이의 화학적 결합을 할 수 있도록 하여야 한다. 즉, 코팅층과 하지 사이 계면에서 밀도가 높고 이종원자 사이에 결합을 유도하는 것이 유리하다. 밀착력의 증대와 코팅되는 박막의 밀도 증대를 위해 시편의 온도를 증가시키는 것이 필수적인데, 이온 bombardment에 의한 시편의 온도를 가열하는 것이 저항가열에 의해서 온도를 증가시키는 것보다 온도를 빨리 올릴 수 있는 장점이 있다. 고밀도, 고밀착 박막을 얻기 위해서 이온 bombardment 과정은 duplex coating 공정이 필수적이며 일반적으로 행해지고 있는 공정이다.

Duplex coating에서 이온질화를 하고 난 뒤 이온질화층에서 화합물층이 형성하게 되면 경질박막을 코팅하기 위해 이온 bombardment를 하게 되는데 그림 8에서 보는 바와 같이 black layer가 형성되어 TiN과 iron nitride 사이에 위치하게 되어 밀착력을 약화시키는 원인이 된다. 금형에서 이러한 black layer를 없애주기 위해서 화합물의 생성을 억제하는 조건에서 이온질화를 하

거나 이온질화후 화합물층을 없애주고 그 위에 경질 박막을 코팅하는 것이 금형의 수명 연장을 위해 매우 중요한 변수이다.

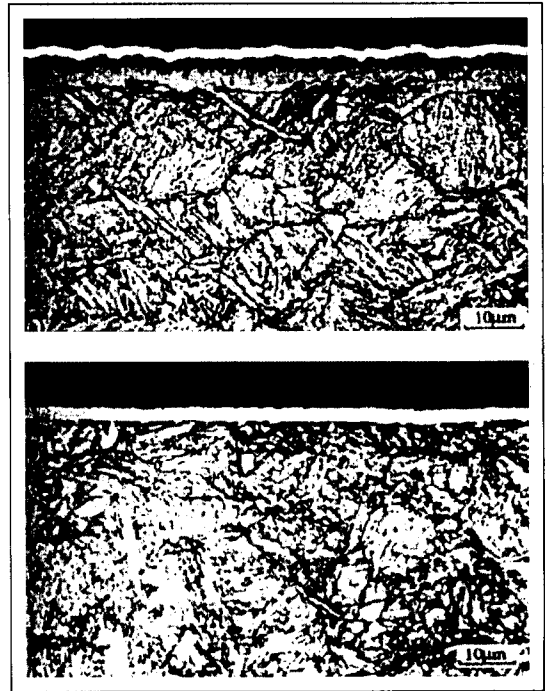


그림 8. Duplex coating에서 화합물층이 있는 경우 black layer 형성

9. 코팅을 하기 위한 금형소지 조건

9.1 표면이 금속으로 노출되어 있는 경우

산화물, 질화물 등의 세라믹 개재물은 밀착력 약화의 원인이 되기 때문에 산화물 등의 개재물을 표면에 가급적으로 나타나지 않도록 하여야 한다. 기능 부위가 아니라고 할지라도 개재물이 있는 경우에는 코팅하는 공정 중에 이상방전을 일으키는 원인이 된다. 비금속 개재물이 표면에 노출하게 되어 이상방전이 일어나게 되면, 이상방전이 기능부위까지 전달되기 때문에 제품전체가 불량품으로 될 수 있으므로 비금속 개재물에 대한 관리를 하여야 한다.

9.2 열처리가 충분히 잘된 경우

코팅층의 밀착력의 향상과 코팅층의 밀도 향상을 위해 코팅시 시편의 온도를 올리는 것은 매우 중요한 변수중의 하나이다. 금형의 코팅을 위해 시편의 종류에 따라서 시편의 온도를 500°C 정도 까지 올리는 경우가 있다. Tempering 온도가 이 온도 이상이면 문제가 되지 않지만 이 온도 이하 일 경우는 문제가 된다. 현재 아크 이온플레이팅의 경우, 온도를 낮게 하여 코팅하여도 밀착력과 코팅층의 밀도를 얻을 수 있는 특징이 있다. 아크 이온플레이팅의 경우라 하더라도 코팅온도를 200°C 이상 올려야 한다. 저온 tempering을 하는 온도가 160°C에서 180°C 정도이므로 코팅층의 밀착력이 문제가 될 수 있다. 이러한 경우에는 tempering 온도를 230°C에서 250°C의 온도에서 tempering 온도를 올리는 것이 좋다.

Quenching을 하는 경우에는 잔류 austenite가 있을 경우, 경도가 문제가 있기 때문에 잔류 austenite를 martensite조직으로 변태시켜 코팅층을 입히는 것이 바람직하다. 이 변태를 이루기 위해서는 subzero 처리를 하는 것이 바람직하다.

9.3 압입이나 고온/저온 등을 이용한 삽입물이 없는 경우

고온, 저온 등이나 압입에 의한 삽입물이 있는 경우에는 접합부에 함유되어 있는 코팅 유해 성분의 영향으로 코팅층이 불량일 수 있다. 또한 이물질이 접합하고 있는 코팅되는 동안이나 제품이 사용되는 도중에 열팽창계수의 차이에 의해 코팅층이 벗겨지는 현상이 발생하기 때문에, 제품을 생산하는 공정을 살펴보고 세심한 주의를 기울이지 않으면 불량 발생의 원인이 되기도 한다.

9.4 소지의 경도가 높은 경우

내마모 목적으로 사용되는 경우에는 소지의 경

도가 높은 조건일수록 박막의 내구성은 좋아진다. 소지의 경도가 충분히 높지 않을 경우 하중에 의해 코팅층이 벗겨지는 현상이 나타날 수 있다.

9.5 면의 조도가 좋은 경우

면의 조도는 코팅층의 밀착력에 영향을 미친다. 면조도가 좋은 경우에는 밀착강도가 좋아진다. 다만 Wire cutting면, 방전가공면, Shibo 면에 의 코팅은 가능하나, 가공시 표면에 산화층이 생성되는 경우에는 코팅층의 밀착력에 영향을 미치므로, 코팅하기 전에 제거하여 주는 것이 좋다.

9.6 소재 표면에 금속피로, 잔류응력이 작은 경우

표면에 잔류응력이 많이 남아 있을 경우 코팅층의 밀착력이 나빠지거나 잔류응력에 의한 충격에 의해 파괴가 일어날 수 있다. 이러한 문제점을 없애기 위해 냉간 소성가공을 거친 제품은 annealing 처리를 한 뒤 코팅하는 것이 좋다. Rough 사상처리를 한 경우에는 표면에 잔류응력이 최소화 되도록 하여 코팅을 하는 것이 밀착력의 향상을 위해 중요하다.

9.7 미세구멍이나 긴구멍이 없는 경우

가는 구멍이 있는 경우와 긴 구멍이 있는 경우에는 구멍의 내부에 코팅이 되지 않는 것은 물론이고, 코팅되는 동안 구멍에서 이상 방전을 일으킬 수 있는 요인으로 작용하기 때문에 arc의 발생이 용이한 조건이다. 또한 구멍이 있을 경우에는 구멍에서 불순물의 가스가 나와서 코팅층에 영향을 미칠 수 있는 요인이다. 높은 성능의 코팅층을 얻기 위한 여러 가지 관리사항을 check하여 성능이 우수한 박막을 얻을 수 있도록 하여야 한다.

위에서 언급한 여러 가지 사항 중에서 열처리

상태와 금속 피로 잔류응력상태가 코팅층의 성능에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 특별하게 관리하여야 하는데 금형의 제조공정에서부터 충분히 관리하는 것이 좋은 코팅층을 얻기 위한 중요한 요인이다.

10. 결 론

산업의 획기적인 발전에 따라 경질박막의 요구도는 증대되고 있다. 각 금형의 특성에 맞게 각각의 표면처리 방법이 다르게 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 여러 가지 코팅층 중에서 코팅층의 잔류응력이 적고 따라서 코팅층의 두께를

두껍게 입힐 수 있는 방법인 CrN 박막의 응용성은 한층 증대될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 박막은 일반적으로 얇기 때문에 소지의 경도를 강화시키기 위해 이온질화, 침탄, 침붕처리를 하고 그 위에 PVD 코팅층을 입힐 수 있는 duplex coating 처리를 하는 것도, 하나의 차기 박막을 개발하는데 중요한 기술로 사료된다.

이러한 수요에 맞게 현재 한국기계연구원 내에 엘트론 산업을 연구원 창업으로 하여, 여러 가지 기능성 경질 박막을 코팅할 수 있는 PVD 장치를 갖추고, 국내 산업계에서 필요로 하는 코팅층을 개발하여 산업화에 앞장서고 있다.