

# 극한 절삭조건에 적합한 새로운 다층 TiAlN 코팅

김종성\*

## An advanced PVD TiAlN multilayer coating for severe cutting conditions

Jong-Seong Gim\*

### ABSTRACT

Increasing demands in productivity are propelling the development of new manufacturing methods like hard machining, high speed cutting (HSC) or machining of difficult to machine materials. In these processes the tools are subjected to very severe mechanical, tribological and thermal loads. They fail prematurely by abrasion, cratering, edge breakage and cold welding. The performance of such tools will be enhanced by better and more wear resistant coatings. The development of these new coatings shows a clear trend towards complex multi-component and multi-layer configurations. TiAlN multilayer coating belongs to these coatings for the new cutting tool generation. This paper tries to explain the benefits of the new coatings. TiAlN multilayer coating offers the following advantages: reduction of manufacturing costs, boost productivity, and lower coolant procurement, conditioning and disposal costs.

Key Words : : PVD(물리증기증착), Plasma (플라즈마), Multilayer coating (다층코팅), Monolayer coating (단층코팅)

### 1. 서론

오늘날 금속가공 산업에 있어서 생산공정은 환경학적 및 경제적 압박을 증가 시킴으로서 결정된다. 예를들면 건삭가공이 더욱 관심을 끌게 되었는데, 그 이유는 환경 기준이 더욱 강화되었고 사용된 냉각제에 대한 처리 비용이 증가하기 때문이다. 냉각제 소비가 줄게되고 피삭재 뿐만 아니라 공구가 높은 열응력을 받게 된다. 생산성 향상 요구 측면에서 고속절삭 또는 가공하기 어려운 난삭재의 기계가공과 같은 새로운 제조 방법을 가속화 시키고 있다.

이들 공정에서 공구는 아주 심한 기계적, 트라이볼로지적 열 하중을 받기 쉽다. 또한 그러한 공구는 마찰, 크레이터 마모, 날파손 및 용착에 의해 잘 파손된다. 이러한 현상이 절삭 공구의 새로운 세대 교체를 요구하였다. 따라서 이들 새로운 공구는 다음과 같은 특징을 가져야 할 것이다. 소재는 미세 초경, 서멧 또는 분말 고속도강과 같은 고품질의 재료로 만들어져야 할 것이다. 그러한 공구는 우수한 내마모 코팅에 의해 강화되어야 할 것이다. 최근의 새로운 코팅은 다성분 및 다층 형상이 혼합된 쪽으로 뚜렷한 추세를 보여주고 있다. TiAlN 다층코팅은

새로운 절삭 공구 세대 위에서 제시한 특성의 코팅이다. 이 논문은 새로운 코팅의 장점을 설명하고자 한다.

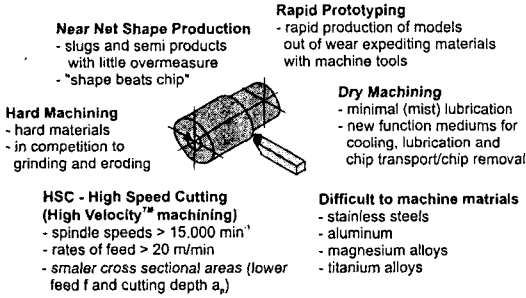


Fig. 1 Modern machining processes in metal cutting operations [1].

## 2. PVD 코팅기술

모든 기술 분야에서 적용되고 있는 공구나 기계요소는 하중을 받기 쉬우며, 그에 따라 표면 뿐만 아니라 치수를 고려해야 한다. 기계요소 크기에 대한 요구는 충분한 치수 선정에 따라 적절한 가격에 맞는 소재 선택으로 이어질 수 있다. 반면 표면에 대한 요구는 상당히 고품질이 요구되는데, 그것은 가격 상승 요인이 된다. 여기서 코팅 기술은 경제적으로 민감하며 기술적 해결책을 제시하고 있다. 비교적 많이 사용되며 가격이 저렴한 모재에 고품질의 코팅재를 적용시켜, 생산성 향상과 적용하중이 비교적 낮아지게 되었다. 코팅은 모재와 실제 힘이 작용하는 표면과 분리시키는 것이 주된 목적이다. 코팅기술은 기술적, 경제적 및 환경 친화적 잠재성으로 인하여 과거에는 핵심 기술이었으며, 미래에는 모든 기술 분야에 새로운 전망을 제시할 것이다[2].

현재 코팅 기술에 있어서 연구 과제는 코팅 공정의 재설계 및 진보 뿐만 아니라, 새로운

적용 분야의 발달을 포함하여 광범위한 영역으로 뻗어 나가는 것이다. 코팅재와 관련되어 있는 것은 코팅 종류의 수를 늘이는 것이며, 코팅층과 모재 사이의 밀착력을 특수처리로 개선시키는 것이다. 이러한 이유 때문에 그 가능성은 무한하다. 그 이유는 코팅 재질 변경이 가능할 뿐만 아니라 다층 코팅이 가능하기 때문이다.

최근의 PVD 코팅 공정은 높은 변형을 받는 공구 및 미세 공차를 갖는 정밀 기계요소예 트라이볼로지적 특성에 맞게 코팅되기에 매우 적합하다. 이러한 공정은 미세 마모 및 저온 내부식 코팅용으로 치수상 증착량을 조절할 수 있어서 모재의 치수에 영향을 미치지 않는다.

Fig. 2에서 처럼 코팅 두께 및 증착 온도는 다른 표면 처리 방법과 비교된다. 예를들면 PVD 공정에 있어서 부품이 받는 온도는 공정에 따라 200~500 °C 범위에 있다. 추가로 지금까지 PVD 공정은 내마모 코팅 적용으로 가장 환경 친화적인 공법이다. 오늘날 금속 및 소성 가공 분야에서 PVD 코팅된 공구 및 금형의 성능은 상당한 수준에 이르렀다. 이와는 대조적으로 기계공학적 측면에서 현재 사용 중인 표면 처리 방법은 서로 움직이는 표면 사이에 마찰을 줄이고 기계 요소의 내마모성을 향상 시키기에 적합치 못하다.

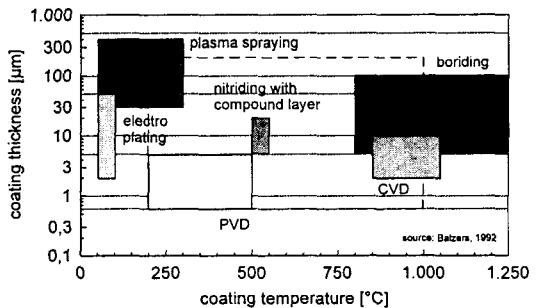


Fig. 2 Coating thickness and coating temperature for various surface treatment processes[3].

PVD 코팅 기술에 따라 진공에서 증착된 박막은 기본적으로 Fig. 3에서 처럼 3가지 상으로 존재한다. 즉

- 물리적 증발 현상을 이용하여 타겟 재료를 가스 상태로 변환
- 소스와 모재 사이의 희소 가스 분위기(플라스마 상태)를 통한 증기 전이
- 모재 표면에 격자상, 즉 박막 형태로 응결[4].

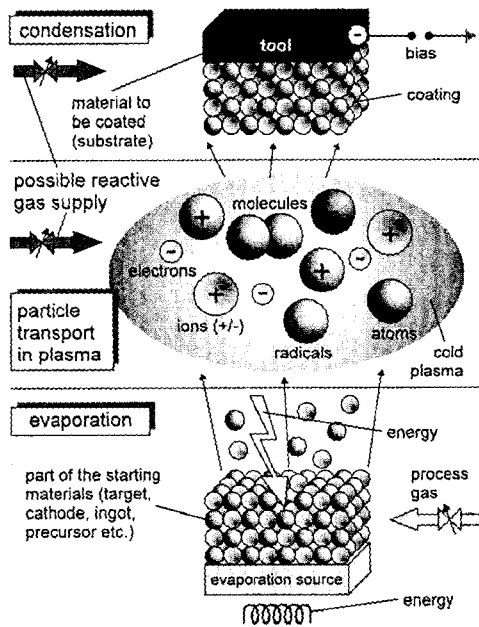


Fig. 3 The three phases of coating formation[5].

증기로 변환된 타겟 재료는 반응성 가스와 반응한다. 왜냐하면 원자 충돌로 인하여 타겟 재료의 이온화가 가능하기 때문이다. 이온화된 분자는 모재의 자기장에 의해 가속화될 수 있다. 이온화율은 물리 증발 기술에 의존한다. 일반적으로 높은 이온화율이 요구되는 즉, 전기적으로 가스-증기 혼합물을 전도하는 플라스마는 많은 양이온 및 음이온(전자+이온)들로 이루어

져 있다.

PVD 공정을 체계적으로 분류하려는 많은 시도들이 있었다. 증발된 입자들의 에너지면에서 보면 열증발(thermal evaporation), 스퍼터링 및 이온 플레이팅과 구별될 수 있다[6]. 열 증발 공정에서 타겟재료는 열 충격에 의해 증기화된다. 결과적으로 중성자 증기는 스스로 진공 챔버안에서 퍼져 나가서 모재 표면에 증착되며, 원자의 운동 에너지는 대략 0.1~0.2 eV이다. 음극 스퍼터링 공정은 완전히 다른 생산 방법으로 높은 에너지를 가지는 희소 가스 이온과 높은 에너지의 중성자 혼합으로 재료가 증기 상태로 바뀌게 된다. 코팅재료는 대부분 디스크 형태로 되어 있고 음전압은 디스크 표면 위로 희소 가스 이온을 가속화 시키는데 사용된다. 표면에 존재하는 코팅재료의 원자와 희소가스 이온의 충돌로 인하여 하나 또는 여러 개의 타겟 재료 분자들이 희소가스 분위기로 방출된다. 스퍼터링된 에너지는 1~40 eV 사이이다. 자기장에 의하여 타겟 전면에서 플라스마를 집중시키는 것이 가능하며, 스퍼터링 공정의 효율도 개선시킬 수 있다. 플라스마 상태에서 금속 타겟으로부터 스퍼터링된 분자들의 이온화율은 1~4%이다.

모재에 음전압으로 플라스마의 2차 이온화가 가능하다. 또 활성화된 가스 분위기에서 증착 동안 모재 표면에 증기 이온들의 방향성이 있는 가속화 특성은 코팅의 경도, 구조, 밀착력 또는 화학적, 열적 안정성과 같은 코팅 특성을 개선시킬 수 있다.

이온 플레이팅 진공 증착 공정은 10~100 eV의 분자 에너지를 가진다[8]. 이온 플레이팅 공정에서 모재 표면 및 코팅층은 코팅 자체 뿐만 아니라 코팅층 및 모재 사이의 계면에 변화를 유발할 수 있는 분자 충돌에 노출된다. 이러한

정의는 단지 모재 표면에서만 발생하는 것을 뜻한다. 반면에 증발 원리에 대한 의문은 아직 해결되지 않았다[6]. 오늘날 산업 분야에서는 증발 원리를 이용한 3가지 코팅 공정을 만들어 냈다. 즉 MSIP, 저전압 전자 빔 증발 및 AIP(아크 이온 플레이팅) 공정이다. 현재 MSIP는 WC/C 코팅을 증착하기 위하여 발저스에서 사용되고 있다. 독일 회사인 CemeCon은 모든 경질 코팅의 증착에 MSIP 공정을 사용한다. 플라즈마의 방향성 영향으로 CemeCon은 30%의 이온화율을 얻고 있다. 이른바 발저스의 공정은 수직 자기장과 저가속 전압에 의하여 고열의 양극으로부터 저전압 전자빔을 끌어낸다. 전자빔은 10KWm<sup>2</sup>의 힘 밀도를 가지고 증발시키려는 재료에 충돌한다. 코팅타겟 재료는 코팅두께, 성분비 및 구조가 전체 높이에 걸쳐서 좋은 균일성을 가지는 코팅층을 생성시키기 위하여 코팅장비 상하로 냉각 시키는 상하 운동 장치 안에 있으며, 증착 챔버를 가로지르는 전자빔은 아르곤 속에 있는 고전류 글로우 방전 내에서 코팅의 이온화율을 높인다. 이온화율은 약 50% 정도이다. 발저스 공정에 있어서 문제점은 용융된 재료의 질화나 침탄에 의해 반응성 코팅 공정 동안 용융된 재료의 증기 특성의 변화이다[10].

가장 많이 사용되는 이온 플레이팅 공정은 아크 증발 방식(AIP)이다. AIP 공정에서 양극 아크 방전은 약 30V에서 200A에 달하는 고전류에 의해 전기적으로 전도체인 코팅재료의 부분 가열 및 증발에 사용된다. AIP 공정의 잇점은 어떠한 위치에서도 증발 소스의 배열이 가능하다는 점이다. 왜냐하면 거의 용융풀이 형성되지 않으며, 이온화율이 90%에 달하기 때문이다. 발저스는 BAI 1200 코팅장비에 아크 증발 방식을 이용하고 있으며, 이것은 Ti 및 TiAl 소

스를 반응성 가스인 질소 가스 속에서 증발 시키게 된다. 그러면 TiAlN 코팅인 TiAlN 다층코팅 및 단층코팅이 생성된다. Fig. 4에 BAI 1200 장비의 사진과 개략도가 있다.

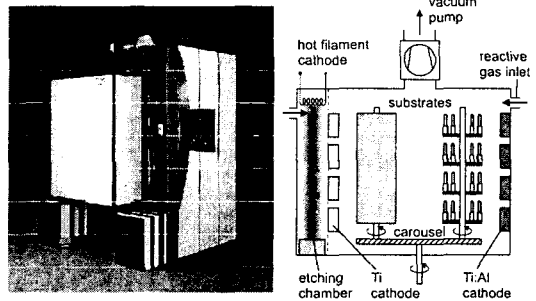


Fig. 4 Balzers BAI 1200 coating system.

### 3. PVD 코팅 재료

지난 수년 동안 경질 코팅은 절삭공구, 포밍공구, 정밀 블랭킹 공구 등에 내마모성 및 공구 수명 개선 효과가 탁월한 것으로 알려진 PVD 공정으로 증착되었다. 코팅은 금속 가공 공정에 생산성을 상당히 증가 시켰는데, 그 이유는 코팅으로 인하여 공구가 상당히 절삭 조건에서도 견딜 수 있게 하고 오늘날 환경, 경제적 요구에 대응할 수 있도록 한다. 가장 상용화된 내마모용 PVD 코팅은 TiN 코팅이다. 첫번째로 TiN 코팅은 공구수명을 개선하기 위하여 개발되었지만, 외관 색상이 금색이어서 시계와 같은 장식용 코팅으로 각광을 받게 되었다[11]. TiN 코팅은 우수한 내마모성과 저마찰계수로 정밀 기계 부품에도 사용되고 있다. TiCN 코팅은 TiN 보다 더 진보된 코팅이다. TiCN 코팅막에는 TiN 격자의 질소 원자가 탄소 원자로 대체된 것으로 생각하면 된다. 질소 원자에 비해 탄소 원자의 지름이 더욱 크기 때

문에 코팅의 격자 구조는 더욱 강화된 구조라고 볼 수 있다. 특히 경도값이 TiN 보다 더 커지며 연삭 마모 저항성도 증가된다. 기계 부품에는

CrN 코팅이 사용되어 내마모 및 내부식재로 사용된다. Ti 기지 코팅에 비해 Cr 기지 코팅의 내부 응력이 더 낮기 때문에 더 높은 코팅 두께로 내마모성을 높일 수 있다.

TiAlN 코팅은 공구에 대한 새로운 코팅이다. Ti 원자 크기가 더욱 작은 Al 원자로 대체되었는데, 이것은 배열전 면심 입방 구조에 변화를 주지는 않는다. 더욱 높은 경도로 인하여 고용체 강화 효과 이외에 Al 원자 대체로 인한 내마모성이 증가하며 화학적 안정성이 더욱 높아져 내산화성도 개선시킨다. 반면 TiN은 600 °C 이상에서는 산화된다. 하지만 TiAlN 코팅은 800 °C 까지도 안정된 내산화성을 가진다. 이것은 코팅층 위에 형성된  $Al_2O_3$  막이 확산과 내마모성을 증가시킨다. TiN 코팅에 비해

TiAlN 코팅은 고온에서도 경도값이 상승함을 보여준다(Fig. 5). 이러한 특성은 기계의 속도를 증가시켜 공구 사용자의 금속 절삭 생산성을 개선시킬 수 있다[12~15]. TiN 코팅은 열적으로 안정된 CVD 코팅 방식에 의해서 제조되기도 하지만 TiAlN 코팅은 플라즈마 공정에 의해서만 생산될 수 있다. 플라즈마 증착에서 TiAlN은 거대 안정상으로 증착된다[9,16].

Fig. 6은 코팅 발달에 관한 실제 추세에 대한 접근방식을 체계적으로 보여주고 있다. 명백하게 코팅의 발달은 기적이 아니다. 공구 코팅을 개선시키는 하나의 가능성은 새로운 경질 코팅재의 발전이다. Ti-N 또는 Cr-N 같은 기본 구조에 원소를 추가 시킴으로써 더욱 좋은

코팅을 얻을 수 있다. 추가의 C, B, O 원소를 가지는 코팅의 경도는 크기가 다른 지름의

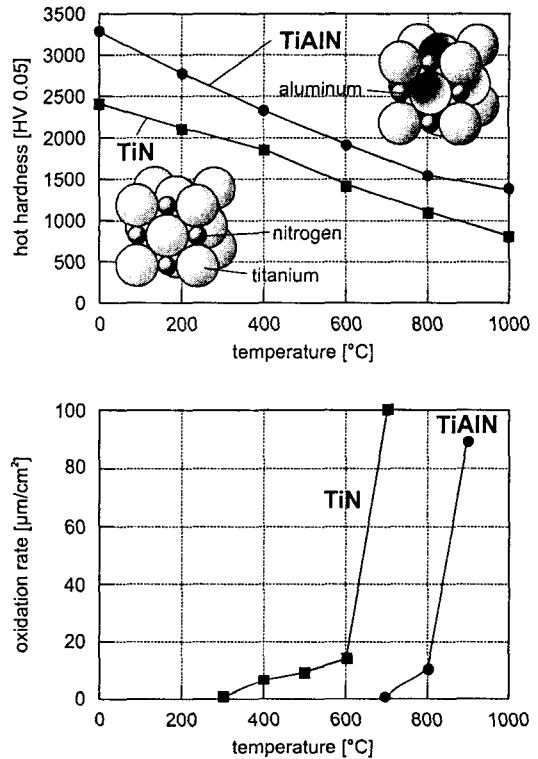


Fig. 5 Hot hardness and oxidation resistance of TiN and TiAlN coatings [9].

원자 대체로 원자 격자의 변형이 발생되어 경도가 더 높아진다. 더욱이 내부압축응력이 증가되어 내균열성이 증가된다.

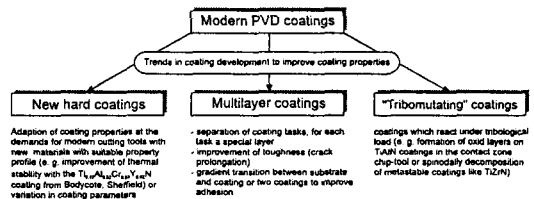


Fig. 6 Actual trend in coating development[1].

코팅된 고융융점을 가진 금속은 열적 안정성 및 내산화성을 개선시킬 수 있다. 또한 코팅은 열전도성을 낮출 수 있으며 모재에 온도 분

포를 균일하게 할 수 있어서 열차폐 효과도 있다. 그리고 공구의 열변동 하중(밀링)으로 발생하는 균열에 대한 저항성도 있다. 칩형성과 절삭력에 관한 코팅의 영향이 Fig. 7에 나타나 있다. 또한 경질코팅의 특성은 증착 파라미터에 의해 영향을 받을 수 있다.

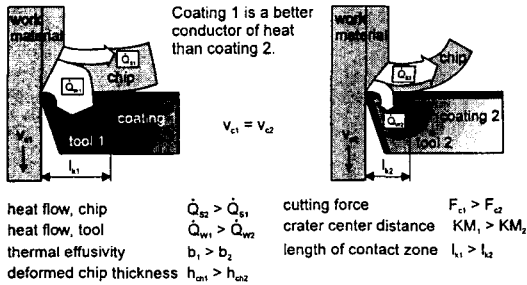


Fig. 7 Contact conditions depending on the thermal conductivity of the coating [17].

TiAlN 다층코팅 및 단층코팅의 특성차이는 음전압이 다름에 기인한다. 저전압 및 반응가스 압력이 높은 상태에서는 코팅층이 (200) 격자 방향(TiAlN 다층코팅)으로 성장하지만, 고전압 및 저압 조건에서는 격자 방향이 (111) 방향(TiAlN 단층코팅)이다. 후자의 격자 방향은 내부응력 및 경도값이 더 높다. 이러한 이유는 모재 표면에 부딪히는 이온 에너지가 더욱 높은 가속 전압을 가지고 있어서 질소 원자와 섞일 가능성이 더 낮아지기 때문이다. 에너지 교환에 의한 열적 전자 이동으로 막 성장 과정 동안 원자의 재배열 영향성이 무시될 수 있는데, 이것은 모재의 온도가 가열에 의해 코팅층 온도와 비슷하게 유지되기 때문이다. 이온에너지가 더 높을수록 더 낮은 가열을 요구한다. 경질코팅에 영향을 미치는 다른 파라미터는 여러가지가 있다. 알루미늄 다이캐스팅에 대한 CrAlN 코팅의 성공은 원자 배열에 기인하는데 이것은 캐스팅될 재료와는 구별된다. CrCN 만

이 잘 적용되기는 하지만 이 코팅의 격자가 항상 육정방향 또는 orthohombic 인것은 아니다. 정방형 "CrN"상은 정방형 Al과 재반응하는 것으로 탄소막 가스와 반응성 가스 압력에 따라 결정된다.

코팅 특성을 개선시키는 또다른 방법은 트라이볼로지적 하중하에서 작용하는 코팅의 개발이다. TiAlN 코팅의 산화 모델은 잘 알려져 있다(Fig. 8). 칩과 공구가 접촉하는 영역에서 발생하는 고열로 인하여 코팅의 상부가 확산되어 산화층이 형성되어 주변 산소와 반응하게 된다. 이러한 보호성 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 피막은 공구의 전체 산화를 방지한다. 또한 기계가공 적용 측면에서 더 좋은 장점은 열전도성이 낮기 때문이다. 즉 열을 더 많이 받게 되면 칩제거를 통하여 발산하게 된다. 따라서 이러한 작용이 절삭속도를 더욱 높이게 된다. 왜냐하면 모재에 작용하는 열 부하가 더욱 낮아지기 때문이다. 또한 TiZrN과 같은 거대 안정상 코팅은 성분 분해가 가능하다. 열적부하를 많이 받는 곳에서 특이한 특성을 가지는 TiN과 ZrN의 두상이 형성된다. "trivomutating"이라는 코팅은 과학적으로 인정이 되질 않는다. 그러므로 metastable 코팅에 대하여 말하는 것이 좋을지도 모르겠다.

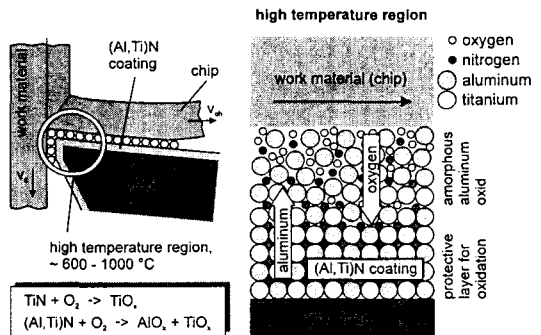


Fig. 8 Oxidation model of (Al,Ti)N coating during cutting process [19].

최적화된 또는 강화된 코팅을 얻기 위한 접근방법은 Fig. 9에 제시한 것 처럼 다층 코팅의 개발이다. 다층코팅은 인성이 높은 특징이 있다. 여러가지 기계적 특성을 지닌 박막을 여러 층으로 증착시킴으로서 표면의 응력집중계수와 균열전진 조건이 변화될 수 있다. 결과적으로 균열은 모재에 도달하기 전에 에너지를 잃어버린다(Fig. 10). Gradient 전이가 있는 모재와 코팅층, 코팅층과 코팅층 사이에서 더욱 우수한 밀착력을 얻으며, 코팅층 사이의 경계에서 특성이 완만한 전이가 일어난다. TiAlN 다층코팅의 TiAl 및 TiAlN 층에서 그러한 gradient 전이는 증착과정에서 알 수 있다. 또한 TiAlN과 WC/C 코팅층 사이에 재료 전이가 있다.

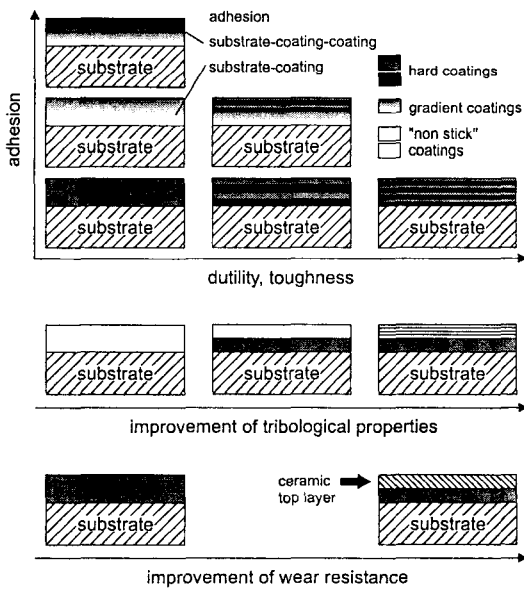


Fig. 9 Design of coatings with improved property profile for modern machining applications [1].

이 코팅은 다층 코팅의 장점을 가지는 또다른 예이다. 제품의 모든 필요한 표면 특성을 가진

만족할 만한 수준의 코팅을 찾는 것은 쉽지 않다. 그렇다면 만족할만한 코팅을 만들 수 있는 것이 해결책이 된다. 각 코팅층은 한가지 또는 일련의 특성을 가지는 표면에 기여한다. 아마도 이러한 경우에 다층 코팅 대신 코팅 합성 체계에 대하여 이야기하는 것이 더 좋겠다. 왜냐하면 서로 다른 특성을 가진 코팅층은 성능 개선 목적으로 조합된 것이다. 예를들면 WC/C와 TiAlN 다층코팅 같은 경우이다. TiAlN 코팅은 내마모성과 열적 안정성이 뛰어나다. 반면 WC/C 코팅은 마찰을 최소화 시켜준다. 표면과 분리시킴으로서 영향을 미칠수 있는 또다른 특성은 내부식성, 화학적 내화산성, 전기전도성, 열전도성 및 모재와의 밀착력이다. 명백하게 다양한 특성의 코팅층을 조합하려는 가능성은 거의 무제한이다. 미래에 한가지 중요한 특성은 공구 제조업자가 요구하는 코팅색상을 공구에 입힐 수 있을지도 모른다.

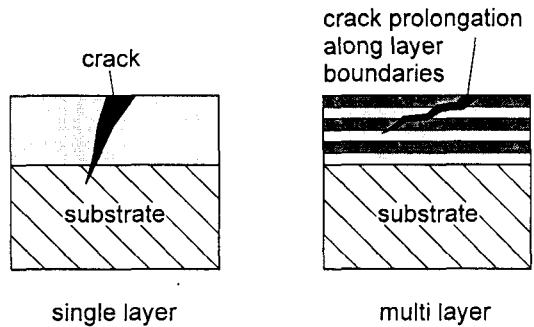


Fig. 10 Possible mechanism of crack deflection and stress relaxation in a multilayer coating system.

#### 4. 결론

경질 PVD 코팅 TiAlN 다층코팅은 다층구조의 인성, 양호한 열적 및 화학적 안정성을 가지는 TiAlN 코팅에서 그 장점을 가져온 새로운 다층 코팅이다. 이렇게 우수한 특성을 조합함으로써 TiAlN 다층코팅은 극한 열응력으로

인한 마모로부터 모든 종류의 절삭공구를 대부분 보호할 수 있는 최선의 선택 사항이다. TiAlN 다층코팅으로 코팅된 공구는 고속 및 고이송으로 사용될 수 있으며, 극한 작동 조건하에서도 공구수명이 연장된다. 이러한 코팅공구는 건식 절삭에 대해서도 사용된다(Fig. 11). 또한 TiAlN 다층코팅은 박리 및 재코팅이 가능하다.

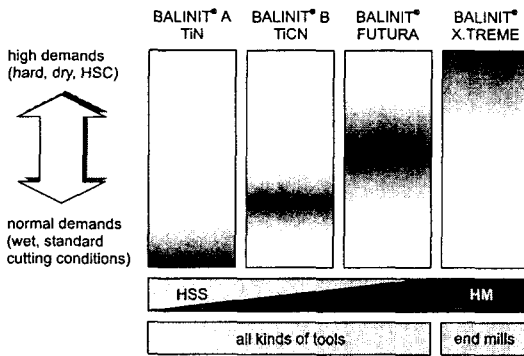


Fig. 11 Coating selection for cutting tools.

Fig. 12에 TiN 코팅과 TiAlN 다층코팅의 마모 크레이터가 비교되어 있다. TiAlN 다층코팅의 다층 구조가 선명하게 보임을 알 수 있다. TiAlN 다층코팅은 다음과 같은 장점이 있다.

- 제조원가 절감
- 생산성 향상
- 냉각제 보충, 관리 및 처리 비용의 절감

여러 가지 코팅의 특성을 Table 1에 정리하였다.

### 참고문헌

[1] H. Zimmermann, "Balinit Schichten die Lösung für moderne Zerspannungsaufgaben, 3<sup>rd</sup> VSM-

Table 1 Mechanical properties of coating

	TiN	TiCN	TiAlN (mono-layer)	TiAlN (multi-layer)
microhardness (Hv 0.05)	2300	3000	3000	3500
coating thickness(μm)	1-4	1-4	1-5	1-4
color	gold	blue-grey	violet-grey	violet-grey
max. service temp.(°C)	600	400	800	800

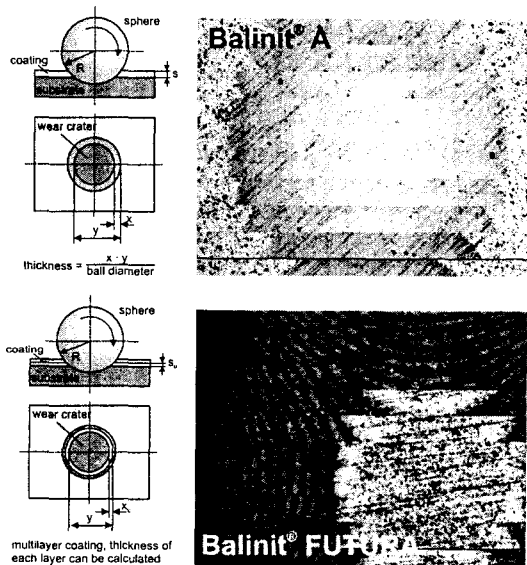


Fig. 12 Calo wear craters of TiN single layer and TiAlN multilayer coating (TiN-TiAlN Multi-layer).

Seminar", Neue Entwicklungen in der spanenden Bearbeitung, Regensdorf, Schweiz, 1999.

[2] E. Lugscheider, H. Zimmermann, "Lehrgang Wzlageretechnik", Teil B, Technische Akademie Esslingen, 1997

[3] M. Laakmann, "PVD-Schichten für



- Przisionsbauteile", Tribologie und Schmierungstechnik, 42. Jahrgang, 6, 1995.
- [4] H. Mayer in M. Auwarter (Ed.), "Ergebnisse der Hochvakuumtechnik und der Physik dünner Schichten", Wissenschaft. Verlagsges. GmbH, Stuttgart, Band II, pp. 221-243, 1971.
- [5] H. Zimmermann, "PVD-beschichtete Schneidstoffe für moderne Zerspanungsanwendungen", Verlag Mainz, Aachen, 1998.
- [6] R. A. Haefler, "Oberflächen- und Dünnschichttechnologie", Teil 1, Beschichtungen von Oberflächen, Springer Verlag, Berlin, 1987.
- [7] G. K. Wehner, G. S. Anderson, in Maissel and Glang (Eds.) "Handbook of Thin Film Technology, McGraw Hill, New York, Chapter 3, 1970.
- [8] H. K. Pulker, "Oberfläche-Surface", p. 21, p. 32, 1980.
- [9] K. Tnshoff, A. Mohlfeld, T. Leyendecker, H. G. Fuss, G. Erkens, R. Wenke, T. Cselle, M. Schwenk, "Wear mechanisms of  $(Ti_{1-x}Al_x)_N$  coatings in drilling", Surface and Coatings Technology 94-95, pp. 603-609, 1997.
- [10] J. Vogel, "Ion Plating Processes for Production of Wear Resistant Coatings on Tools in H. K. Pulker et al. (Ed.)", Wear and Corrosion Resistant Coatings by CVD and PVD, expert Verlag, Ehningen, 1989.
- [11] E. Bergmann, "Mechanical and Tribological Properties of Wear Protection Coatings Produced by PVD Methods; in H. K. Pulker et al. (Ed.)", Wear and Corrosion Resistant Coatings by CVD and PVD, expert Verlag, Ehningen, 1989.
- [12] P. C. Jindal, D. T. Quinto, P. Rdhammer, A. Maierhofer; Proc. 12<sup>th</sup> Plansee Seminar, Metallwerk Plansee GmbH, 3, p.391, 1989.
- [13] O. Knotek, M. Bhmer, T. Leyendecker; J. Vac. Sci. Technol., A4, 2695, 1986.
- [14] H. Jehn, S. Hofmann, W. D. Munz, Metall., 42, 658, 1988.
- [15] F. Jungblut, H. Brndle, H. Schulz, Metalloberfläche, 50, 12, 1996.
- [16] H. G. Prengel, A. T. Santhanam, R. M. Penich, P. C. Jindal, K. H. Wendt, "Advanced PVD-TiAlN coatings on carbide and cermet cutting tools", Surface and Coatings Technology 94-95, pp. 597-602, 1997.
- [17] W. Knig, R. Fritsch, D. Kammermeier, "Physically vapour deposited coatings on tools performance and wear phenomena", Surface and Coatings Technology, 49, pp. 316-324, 1991.
- [18] E. Lugscheider, O. Knotek, C. Barimani, S. Guerreiro, H. Zimmermann, "Cr-C-N coatings deposited with different reactive carbon carrier gases in the arc PVD process", Surface and Coatings Technology 94-95 pp. 416-421, 1997.
- [19] N. N., "Advertising paper of Shinko Kobelco Ltd."