

〈論 文〉

TiN 코팅된 고속도강과 합금공구강의 마멸거동

김석삼* · 서창민* · 류춘무** · 박준목**

(1994년 10월 8일 접수)

Wear Behavior of TiN Coatings Deposited on High Speed Steel and Alloy Tool Steel

Seock-Sam Kim, Chang-Min Suh, Chun-Moo Ryu and Jun-Mock Park

Key Words : Ceramics(세라믹), Wear(마멸), Coating(피복), PVD(물리증착법), High Speed Steel(고속도강), Alloy Tool Steel(합금공구강)

Abstract

The wear characteristics and wear mechanisms in TiN coating deposited on high speed steel and alloy tool steel by ion plating were investigated. Pin on V-block wear tester was used for a wear test method. The specimen was composed of three kinds of high speed steel and alloy tool steel which had different hardness by changing the heat treating condition. Three kinds of coating thickness were also applied to each specimen. Microscopic observation of worn surfaces was made by SEM. The scratch test of coating surface by the ion plating showed that critical load to break the coating interface was greater than 50N. The critical load increased with both substrate hardness and coating thickness. The wear resistance of TiN coated high speed steel became 10 times greater than that of non-coated ones. SEM observation showed that leading edge of contact was compressive and trailing edge was under maximum tensile stress and then surface cracking broke out perpendicular to sliding direction.

1. 서 론

세라믹은 일반강에 비하여 밀도가 낮고 고온 경도 및 강도가 높으며, 열팽창률이 적고 내열충격성, 내식성, 내마멸성이 뛰어나므로 각종공구나 기계부품 등의 특수한 환경하에서 사용이 증가되고 있다. 또한 이러한 세라믹의 특성을 이용하여 금속 표면에 세라믹 코팅층을 형성시켜 정밀기계 분야와 반도체 산업에 널리 이용하고자 하는 경향이 고조되고 있다.^(1~3) 내마멸성과 고정밀도 및 생산성향상을 요구하고 있는 절삭공구와 금형분야에도 세라

믹코팅이 활용되고 있다.^(4,5) 특히 높은 경도, 화학적 안정성 및 낮은 마찰계수를 갖는 TiN이 코팅재로서 주목을 받고 있으며 공구재료 이외에 보론주철⁽⁶⁾과 알루미늄합금⁽⁷⁾에도 그 응용이 연구되고 있다. TiN 코팅층의 마멸거동은 모재의 기계적성질 및 계면의 화학적 조성과 모재와 코팅층사이의 밀착력이 큰 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.⁽⁸⁾

최근 Yoon과 Cho 등⁽⁸⁾은 고속도강을 AIP법으로 코팅한 TiN과 알루미늄과 베어링강과의 마멸실험에서 모재의 경도와 코팅층의 두께에 따른 마멸천이 기구가 발생함을 보였다. 그러나 TiN 코팅층의 마멸기구는 아직까지 명확하게 규명되지 못하였다.

이에 본 연구에서는 고속도강(SKH9)과 합금공구강(STD11)을 모재로 하여 PVD법에 의한 TiN 세

*정회원, 경북대학교 기계공학과

**경북대학교 대학원 기계공학과

라믹재를 코팅재로 하여 모재의 경도와 코팅층의 두께를 다르게한 시험편을 제작하여, 상온 상압하에서 마찰·마멸실험을 수행하고 그 특성과 마멸기구를 규명하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 시험기는 Falex사의 마찰 마멸시험기로서 핀과 V-블록(pin on V-block)방식이며 Fig. 1에 그 개략도를 나타내었다. 중앙의 핀이 회전하며 V-블록에 하중을 가하도록 되어있다.

본 실험에서는 V-블록의 표면에 코팅을 하였으며, 핀에는 코팅하지 않은 시험편을 사용하였다. 코팅된 V-블록과 코팅하지 않은 핀의 접촉부 네곳에서 마멸이 진행되어 마멸흔적(wear scar)이 생긴다. 실험은 2번 반복하였으며, 마멸량 산출은 5회 측정하여 평균을 취하였다. 마찰력은 로드셀을 통하여 토크게이지에 전달되며 이 토크게이지는 17 N·m까지 측정이 가능하다. 핀의 회전속도는 290 rpm으로 일정하게 하였으며, 하중은 1000 N, 1200 N, 1400 N으로 하였다. 윤활유로서는 절삭유와 물을 1 : 10의 비율로 혼합한 것을 사용하였다. 실험 중 윤활유를 계속 순환시켜 온도상승이 없도록 하였다. 마멸량은 공구현미경을 사용하여 마멸폭을 측정하여 산출하였다.

2.2 시험편

본 연구에서 사용된 모재는 고속도강(SKH9)과 냉간가공용 금형에 사용되는 공구강(STD11)이다. 이들의 화학 조성은 Table 1과 같다. Fig. 2는 시험편의 크기 및 모양을 나타낸 것으로, (a)는 V-블록을 나타내며, (b)는 핀의 형상을 나타낸 것이다. 그림에서 (a)의 V-블록은 직경 12.7 mm, 높이 10.7 mm로 절삭가공한 후 중앙에 90°의 홈을 연삭하였으며, V-블록과 핀의 진실접촉면(real contact area)을 양호하게 하기위해 V-블록의 중앙에 6 mm를 두고 양쪽을 연삭가공 하였다. 그림(b)의 핀은

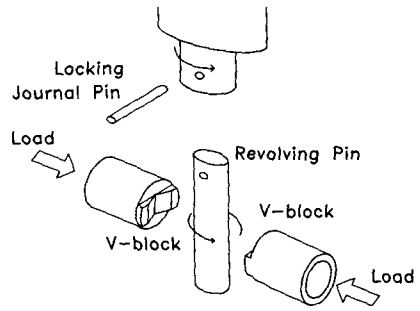


Fig. 1 Schematic diagram of tester

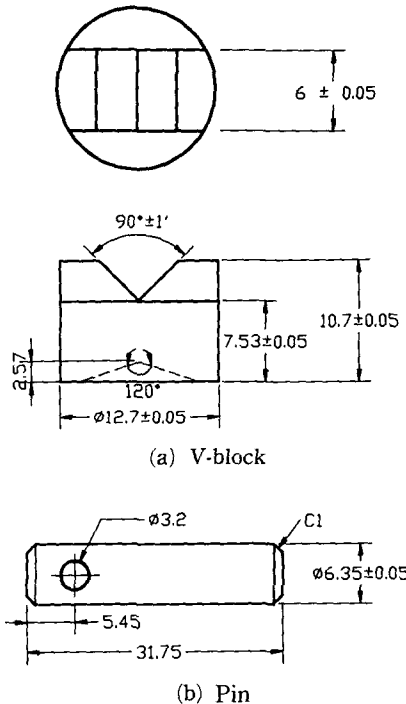


Fig. 2 Shape and size of specimens(unit : mm)

직경 6.35 mm, 길이 31.75 mm로서 Centerless 연마가공을 하였다. 각 시험편의 모재는 다음과 같은 열처리 공정을 통하여 경도가 다른 세가지 종류인 시험편을 제작하였다.

먼저, 고속도강의 열처리는 시험편을 진공 열처리로에 넣고 모든 시험편을 650°C 및 850°C에서 각

Table 1 The chemical composition of high speed steel(SKH9) and alloy tool steel(STD11)

Element	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Ni
SKH9(wt%)	81.38	0.84	0.38	0.34	4.20	4.85	5.7	1.94	0.35
STD11(wt%)	83.45	1.51	0.39	0.58	12.2	1.03	—	0.34	0.47

각 1시간 30분간 예열을 거쳐, 1200°C에서 1시간 30분간 유지시킨 후 공냉시켰다. 이 시험편을 다시 열처리로에 넣고, V-블록은 690°C, 640°C, 580°C에서 그리고 핀은 720°C, 580°C에서 각각 2시간 동안 템퍼링(tempering)하였다.

이렇게 템퍼링 온도를 변화시켜서 V-블록의 모재경도는 H_{RC}52, H_{RC}57, H_{RC}65이었고, 핀의 모재경도는 H_{RC}47, H_{RC}65인 고속도강 시험편을 얻었다.

합금공구강인 STD11의 열처리는 650°C(2시간), 850°C(3시간)의 예열을 거친 후 1050°C에서 3시간 30분 동안 유지시킨 다음, 기체화된 질소가스로 냉각시켰다. 그런 다음 580°C, 540°C, 480°C에서 각각 2시간 동안 유지시킨 후 공냉시켰다. 그 결과 시험편의 경도가 각각 H_{RC}53, H_{RC}57, H_{RC}63인 시험편을 얻었다.

열처리가 끝난 후 각 종류의 시험편을 1차 연삭하여 크기를 같게 한 다음 연마지 #320Cw, #600Cw, #1000Cw, #1200Cw, #2000Cw 순으로 물을 묻혀서 연마하여 표면거칠기가 0.08 μm R_{max}인 시험편을 얻었다.

TiN의 코팅은 PVD법의 한 종류인 아크 방전식 이온 플레이팅(arc ion plating)법으로 모재에 TiN 코팅층을 만들었으며, 본 실험에서는 코팅층의 두께가 모재의 경도에 따른 내마멸성 등에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 코팅시간을 달리하여 코팅층의 두께를 각각 1.0 μm, 1.5 μm, 2.5 μm로 만들었다. 코팅층의 표면거칠기는 최대높이 거칠기를 구하여 Table 2에 나타냈다.

고속도강 및 합금공구강의 TiN 코팅층 경도값을 마이크로 비커스경도기로 10회 측정하여 평균한 경도값을 코팅층의 두께 및 모재의 경도에 따라 Table 3에 나타내었다. 고속도강 및 합금공구강 모두 모재의 경도가 높을수록, 그리고 코팅두께가 두꺼울수록 경도가 높게 나타났다. 이 값은 마이크로 비커스 경도의 작용하중을 25g으로 가능한 작게하여 시험하였으며, 모재의 경도 및 코팅두께에 영향을 받은 것으로 생각된다.

그리고 코팅층의 마멸거동에 중요한 영향을 미치는 코팅층과 모재사이의 접착강도를 본 실험에서는 긁기시험법(scratch test method)을 이용하였으며 코팅층이 파괴되는 임계하중을 구하였다.⁽⁹⁾ 이 방

Table 2 The surface roughness of TiN coating layer for the various substrate hardness of SKH9 and STD11(t=2.5 μm)

Substrate hardness(SKH9)	H _{RC} 52	H _{RC} 57	H _{RC} 65
R _{max} (μm)	1.66	1.88	1.95
Substrate hardness(STD11)	H _{RC} 53	H _{RC} 57	H _{RC} 63
R _{max} (μm)	1.79	1.98	1.89

Table 3 Vickers hardness of TiN coating layer for various coating thickness and substrate at SKH9 and STD11(Load : 25 g)

Substrate hardness		Coating thickness	1.0 μm	1.5 μm	2.5 μm
HV(kgf/mm ²)[SKH9]	545(H _{RC} 52)	—	—	—	1554 ± 96
	635(H _{RC} 57)	1218 ± 97	1594 ± 140	1688 ± 75	
	830(H _{RC} 65)	—	—	1757 ± 110	
HV(kgf/mm ²)[STD11]	560(H _{RC} 53)	—	—	1257 ± 74	
	635(H _{RC} 57)	1274 ± 120	1706 ± 96	1721 ± 142	
	770(H _{RC} 63)	—	—	1717 ± 114	

(Pin : HV = 830)

법은 코팅층의 표면에 200 μm 의 곡률을 갖는 다이아몬드 압자를 올려놓고 하중을 선형적으로 증가시키면서 시험편을 고정하고 있는 스테이지를 일정한 속도로 움직였을때 하중이 어느 임계점에 이르렀을때 코팅층이 파괴되면서 AE신호가 방출되게 된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 코팅층 파괴의 임계하중

Fig. 3은 굽기시험을 할 때 코팅층의 표면에 형성된 스크래치(scratch)를 보여주는 SEM사진과 다이아몬드 압자에 가해진 하중에 따른 AE신호의 변화를 보여주는 것이다. 낮은 하중에서는 AE신호가 발생하지 않다가, 하중이 약 80 N에 도달하면 코팅층이 파손됨에 따라 AE신호가 갑자기 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 코팅층이 파괴되는 수직하중을 임계하중이라 정의한다.

Table 4는 고속도강 및 합금공구강의 코팅두께가 2.5 μm 인 시험편에 대하여 모재의 경도변화에 따른 임계하중을 구한 것이다. 모재의 경도가 클수록 코팅층이 파손되는 임계하중이 크게 나타났다. 즉, 모재의 경도증가는 계면의 전단강도의 증가를 초래하여 임계하중이 증가하는 것으로 생각된다. 고속도강과 합금공구강의 TiN과의 결합정도는 코팅층의 파괴에 이르게 하는 임계하중의 크기에 상호관계가 있다. Table 4의 임계하중치는 동일조건하의 굽기시험을 4번 반복한 결과를 나타낸 것으로서 고속도강이나 합금공구강의 모재경도와 임계하중이 상관관계에 있으며 합금공구강보다는 고속도강에서

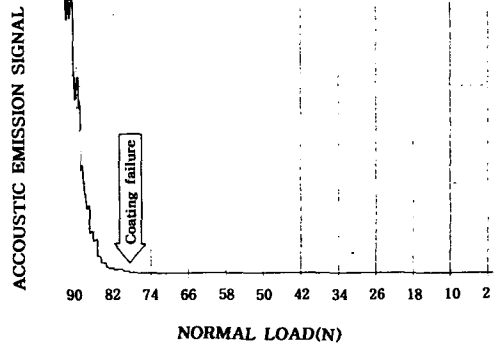


Fig. 3 Variation of acoustic emission signal and a typical scratch formed on coating surface during the scratch test. Note the shape increase of AE signal at the point of coating failure

경도의 영향이 더욱 현저함을 알 수 있다. 이는 모재경도가 클 경우, 고속도강의 TiN과의 결합정도가 합금공구강의 결합정도보다 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 Table 5에는 모재경도 H_{RC57} 로서 모

Table 4 Variation of critical load for coating failure determined by scratch test with substrate hardness at SKH9 and STD11($t=2.5 \mu\text{m}$)

SKH9	Substrate hardness	$H_{RC} 52$	$H_{RC} 57$	$H_{RC} 65$
	Critical load(N)	50 ± 4	70 ± 10	83 ± 8
STD11	Substrate hardness	$H_{RC} 53$	$H_{RC} 57$	$H_{RC} 62$
	Critical load(N)	66 ± 5	67 ± 1	70 ± 4

Table 5 Variation of critical load for coating failure determined by scratch test with coating thickness at SKH9 and STD11(substrate : H_{RC57})

Coating thickness	1.0 μm	1.5 μm	2.5 μm
Critical load(N)(SKH9)	72 ± 2	73 ± 4	88 ± 5
Critical load(N)(STD11)	64 ± 4	65 ± 5	70 ± 3

재의 경도가 같을 때 코팅두께의 변화에 대한 임계 하중을 구한것으로 코팅층의 두께가 두꺼울수록 임계하중이 크게 나타났다.

3.2 코팅층 마멸의 하중의존성

Fig. 4는 모재경도가 H_{RC}57인 고속도강에 2.5 μm 로 TiN을 코팅한 시험편을 각각 1000 N, 1200 N, 1400 N으로 하중을 변화시켜 시험하였을때 미끄럼 시간에 따른 마멸폭의 변화를 보여주는 그림이다. 또한, 코팅하지 않은 시험편의 결과도 함께 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 코팅한 시험편의 마멸 거동은 하중이 1000, 1200, 1400 N에서 각각 코팅 층파괴에 의해 마멸기구가 바뀌는 마멸전이(wear transition)현상이 나타났다. 즉, 천이 이전에는 마멸량의 증가속도가 작았다. 그러나 코팅층이 마멸 되고 모재가 들어나기 시작하는 천이 이후에는 마멸량의 증가속도가 크게 증가하였다. 이것은 코팅 층의 마멸거동이 초기마멸단계에서 하중에 따른 전 반적인 마멸거동은 하중이 높을 경우 마멸량이 많고 마멸천이가 일어나는 시점이 빨리 나타났다. 하중이 1400 N으로 같을 때 코팅한 시험편과 코팅하지 않은 시험편의 마멸량을 비교해 보면, 마멸흔적의 폭이 400 μm에 도달하는 시간이 코팅한 시험편은 100분이고, 코팅하지 않은 시험편은 10분으로 코팅한 시험편이 10배 정도 길게 나타났다. 이것은 코팅한 시험편의 내마멸성이 10배로 향상되었음을 의미한다.

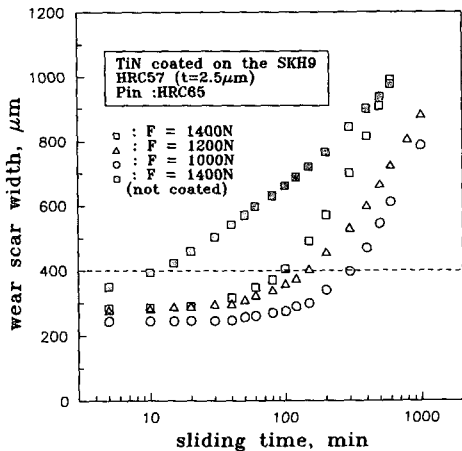


Fig. 4 Variation of wear scar width for specimens of various loads as a function of sliding time at substrate hardness H_{RC}57

3.3 코팅층 마멸의 모재경도 의존성

Fig. 5는 고속도강의 경도가 H_{RC}52, H_{RC}57, H_{RC}65 인 고속도강 시험편에 2.5 μm로 TiN 코팅층을 형성시킨 시험편들을 하중 1200 N인 경우의 미끄럼 시간에 따른 마멸량의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 모재경도가 클수록 마멸기구의 천이가 늦게 일어나는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 합금공구강의 경도가 H_{RC}53, H_{RC}57, H_{RC}63인 시험편상에 2.5 μm의 TiN코팅층을 형성시켜서 Fig. 5와 동일조건에서 마멸실험을 수행한 결과이다. Fig. 6에서도 모재경도가 큰 H_{RC}63의 것이 마멸천

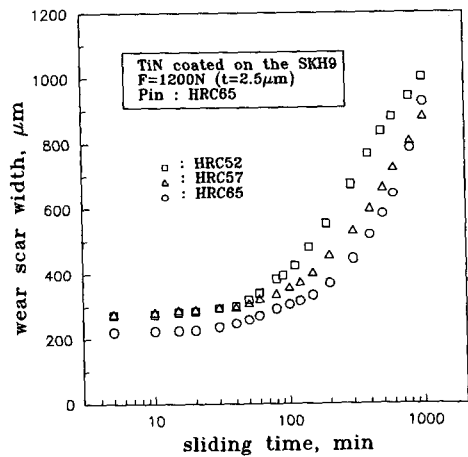


Fig. 5 Variation of wear scar width for specimens of various substrate hardness as a function of sliding time at 1200N

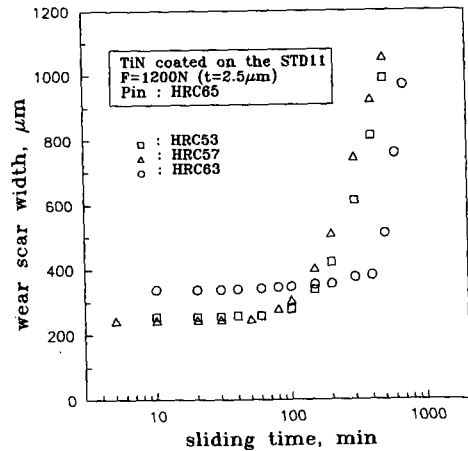


Fig. 6 Variation of wear scar width for specimens of various substrate hardness as a function of sliding time at 1200N

이가 제일 늦게 발생했음을 알 수 있다. 그리고 합금공구강의 경우는 초기마멸과 천이 이후의 정상마멸이 확실하게 구분되며, 초기마멸단계에서는 거의 마멸량이 없으며, 마멸천이 이후 즉, 코팅층의 파손이후의 마멸은 급격하게 진행되고 있다. Fig. 7은 Fig. 5와 Fig. 6으로부터 모재경도별로 마멸천이를 가져오는 코팅층 파괴시간을 나타낸 것이다. Fig. 7로부터 모재의 경도가 클수록 마멸천이가 늦게 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 회전하는 핀의 경도가 H_{RC}47이고, 이에 접촉하는 V-블록은 고속도강으로서 모재경도가 다른 시험편에 2.5 μm의 코팅층을 형성시키고 하중 1200 N으로 시험한 경우의 실험결과이다. Fig. 5에

비해서 회전하는 핀의 경도가 H_{RC}65에서 H_{RC}47로 저하된 것으로서 모재경도의 효과가 분명히 나타나고 있다. 모재경도가 클수록 마멸폭이 적어짐을 알 수 있다.

3.4 코팅층 마멸의 코팅두께 의존성

Fig. 9에 고속도강과 합금공구강의 모재경도가 H_{RC}57이고 하중이 1200 N으로서 1.0 μm, 1.5 μm, 2.5 μm의 세가지 경우에 대해서 마멸기구의 천이를 가져오는 코팅층 파괴시간을 구하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 코팅층의 두께가 클수록 코팅층의 파괴시간이 길다는 것을 보여주고 있다. 그 효과는 고속도강과 합금공구강이 거의 유사한 경향을 보인다.

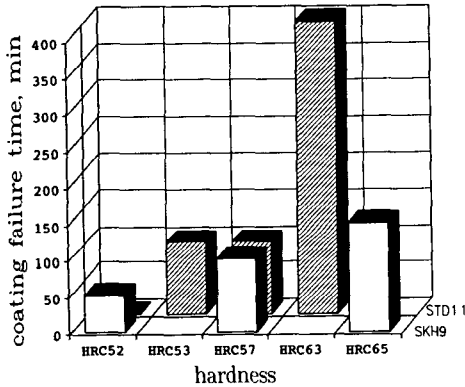


Fig. 7 Comparison of coating failure times for specimens of SKH9 and STD11 of different substrate hardness(F=1200N, t=2.5 μm)

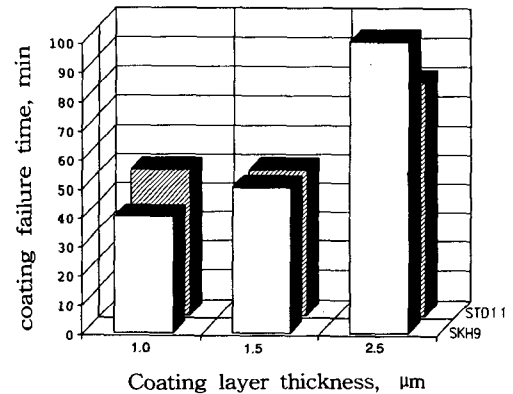


Fig. 9 Comparison of coating failure times for specimens of SKH9 and STD11 of different coating layer thickness(substrate hardness: H_{RC}57, F=1200N)

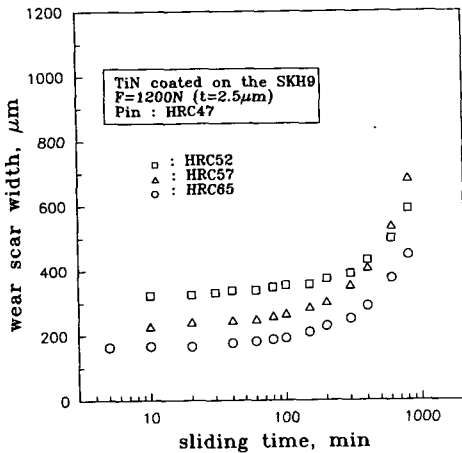


Fig. 8 Variation of wear scar width for specimens of various substrate hardness as a function of sliding time at 1200N



Fig. 10 SEM photograph of cross section of TiN coating layer after sliding time of 30min(H_{RC}52, F=1200N, t=1.0 μm)

3.5 마멸면의 미시적 관찰

Fig. 10은 모재경도가 H_{RC52} 인 고속도강 시험편에 $1.0 \mu\text{m}$ 의 코팅층을 하중 1200 N 을 가하여 30분간 마멸실험을 수행한 시험편의 단면을 SEM으로 관찰한 것이다. 코팅층은 $0.6 \mu\text{m}$ 으로서 30분간 $0.4 \mu\text{m}$ 의 마멸이 발생한 것으로 생각되며 가압하중으로 인해서 코팅층이 압축변형이 되어있음을 알 수 있다. Fig. 11은 Fig. 10과 동일조건에서 미끄럼 시간이 300분간 지난후의 마멸면 사진이다. Fig. 11의 (a)는 trailing edge이며 (b)는 leading edge이다. 그림에서 보여주는 것같이 TiN 코팅층이 거의 탈락되어 모재가 드러나서 마멸초기 후의 마멸면을 보여주고 있다. (사진의 흰 부분이 모재부분) 그림(a)의 trailing edge부분에서는 모재와 코팅층부분이 소성변형과 더불어 박리현상과 균열들이 발생하고 있음을 알 수 있다. (b)의 leading edge부분에서도 코팅층이 심하게 밀리면서 부분적으로 균열이 발생

했음을 알 수 있다. Fig. 12는 모재경도가 H_{RC52} 이고 코팅층두께가 $2.5 \mu\text{m}$ 인 합금공구강이 하중 1200 N 하에서 300분간 마멸시킨 이후의 마멸면 SEM사진이다. Fig. 12의 (a)는 leading edge이고 (b)는 trailing edge이다. 미끄럼방향은 아래에서 위쪽을 향하고 있다. Fig. 11의 고속도강의 경우처럼 코팅층이 거의 마멸되어 모재가 드러난 상태에서 leading edge와 trailing edge에서의 심한 소성변형과 더불어 미끄럼방향에 수직인 표면 균열들이 많이 발생하여 있다. 그것은 trailing edge가 인장응력을 받으므로 인장력에 의한 표면균열이 발생함을 알 수 있다. 그리고 표면균열의 발생원은 기공과 같은 표면결함으로부터 응력집중현상에 의해서 표면균열이 발생되고 있음도 알 수 있다. 이것은 Hamilton⁽¹⁰⁾의 미끄럼접촉 응력해석과 Kim 등⁽¹¹⁾의 세라믹 미끄럼 마찰에서의 표면균열해석에서 trailing edge에서 최대인장응력과 최대응력 확대계



(a) Trailing region, sliding time : 300 min

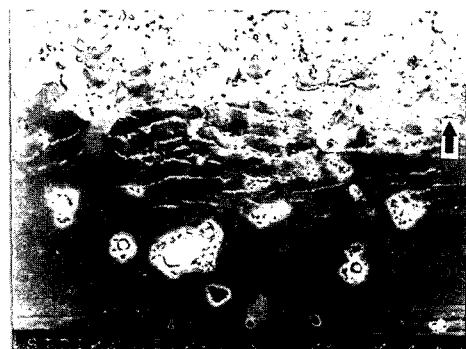


(b) Leading region, sliding time : 300 min

Fig. 11 SEM photograph of the worn surface of TiN coating layer after sliding time of 300min. The arrow represents sliding direction(H_{RC52} , $F=1200 \text{ N}$, $t=2.5 \mu\text{m}$, substrate : SKH9)



(a) Leading region, sliding time : 300 min



(b) Trailing region, sliding time : 300 min

Fig. 12 SEM photograph of the worn surface of TiN coating layer after sliding time of 300min. The arrow represents sliding direction(H_{RC52} , $F=1200 \text{ N}$, $t=2.5 \mu\text{m}$, substrate : STD11)

수가 존재함을 보인것과 일치하고 있다.

4. 결 론

절삭공구로 사용되는 고속도강(SKH9)과 냉간금형용으로 사용되는 합금공구강(STD11)을 모재로 하여 열처리조건을 다르게 함으로서 모재경도가 다른 세가지 종류와 PVD법의 일종인 이온플레이팅 방법으로 TiN세라믹을 코팅하여 코팅층두께가 1.0, 1.5, 2.5 μm 인 세 가지 종류의 시험편과 상대편재료로서 열처리한 고속도강(SKH9)을 사용하여 상온상압하에서 미끄럼 마찰 마멸실험을 수행하여 마멸특성을 규명하고 SEM관찰을 통해서 그 마멸기구를 고찰하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) TiN코팅층의 모재와 코팅층의 밀착강도시험은 굽기시험을 통해서 코팅층파손이 발생하는 임계하중이 50 N 이상으로서 지금까지 보고된 임계하중값이 30~50 N이었던 것과 비교할 때 이온플레이팅 코팅법이 양호한 방법이다.

(2) 코팅층 임계하중은 모재의 경도가 코팅층두께에 크게 의존하며, 모재경도가 클수록, 코팅두께가 두꺼울수록 증가한다.

(3) 고속도강과 합금공구강의 TiN코팅층의 마멸기구는 초기마멸과 코팅층이 파괴되어 모재의 접촉에 의한 정상마멸로서 마멸천이가 발생하였으며, 합금공구강의 초기마멸상태의 마멸량이 고속도강의 초기마멸상태에서의 마멸량보다 적었다.

(4) 고속도강은 TiN코팅으로 인해서 코팅하지 않은 것에 비해서 내마멸성이 10배 정도 향상되었다.

(5) TiN코팅층의 마멸은 접촉부의 leading edge가 소성변형을 일으키면서 압축응력과 전단응력이 복합적으로 작용하면서 trailing edge의 인장응력으로 인한 표면균열의 발생과 전파로 마멸이 진행된다.

후 기

본 연구는 1993년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME 93-C-04)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Hocking, M. G., Vasantasree, V. and Sidky, P. S., 1989, *Metallic and Ceramic Coatings*, Longman Scientific & Technical, New York.
- (2) Sundgren, J. E. and Hentzell, H. T. G., 1986, "Critical Review: A Review of the Present State of Art in Hard Coatings Grown from the Vapor Phase," *J. Vac. Sci. Technol.*, A₄(5), pp. 2259~2273.
- (3) Hedenqvist, P., Olsson, M., Wallén, P., Kassman, Å., Hogmark, S. and Jacobson, S., 1990, "How TiN Coatings Improve the Performance of High Speed Steel Cutting Tools," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 41, pp. 243~256.
- (4) 김동원, 권오관, 이준근, 천성순, 1988, "Coated Si₃N₄-TiC Ceramic공구의 마모특성," 한국윤활학회지, 제4권, 제2호, pp. 44~51.
- (5) 김홍우, 김문일, 1992, "TiN 박막을 코팅한 드릴의 수명향상에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제16권, 제12호, pp. 2340~2348.
- (6) 송 건, 윤의성, 안효석, 1992, "CAE증착기술에 의해 TiN이 증착된 보론주철의 마모거동," 한국윤활학회지, 제8권, 제1호, pp. 63~69.
- (7) 공호성, 권오관, 김형선, 1993, "알루미늄 합금 표면에 코팅된 세라믹재의 마찰마멸 특성," 대한기계학회논문집, 제17권, 제12호, pp. 3083~3093.
- (8) Yoon, K. J., Cho, S. J., Kim, S. S., Yoon, M. S. and Yang, S. H., 1993, "Wear Mechanism of TiN-Coated High-Speed Steel during Sliding," *Wear*, Vol. 170, pp. 101~108.
- (9) 양승현, 1992, "고속도강에 Arc Ion Plating으로 코팅한 TiN의 마모거동," 경북대학교, 석사학위논문, 대구.
- (10) Hamilton, G. M., 1983, "Explicit Equations for the Stresses beneath a Sliding Spherical Contact," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 197C, pp. 53~59.
- (11) Kim, S. S., Kim, S. W. and Hsu, S. M., 1994, "A New Parameter for Assessment of Ceramic Wear." *Proc. of the 6th Nordic Symposium on Tribology*, pp. 341~348.