

# 고속도강에 코팅한 TiN의 마모기구

양승현\*, 윤경진, 조성재, 김석삼\*, 윤명수\*\*

한국표준과학연구원 소재평가센터,

\* 경북대학교 기계공학과

\*\* 한국 AIP 센터

## 1. 서론

금속재료에 경도가 큰 TiN을 코팅하면 우수한 내마모성능을 얻을 수 있기 때문에, 이 TiN 코팅은 절삭공구나 금형등의 수명을 향상시킬 수 있는 방법이라고 기대를 모으고 있다. 특히 최근에는 물리증착법이 개발되어, 비교적 낮은 온도에서 연화되는 재료에도 코팅할 수 있게 됨에 따라, 엔드밀, 드릴등의 고속도강계의 절삭공구나 금형등의 수명을 크게 향상시킬 수 있는 방법으로 이 TiN코팅이 커다란 주목을 받게 되었다. 그러나 이 TiN 코팅이 미끄럼중에 어떻게 마모되는지는 아직도 잘 알려지지 않고 있다.

본 연구의 목적은 고속도강에 코팅된 TiN의 마모기구를 실험적으로 관찰하여 규명하는 것이다.

## 2. 실험방법

본 실험에서 사용한 모재의 강종은 KS 규격으로 SKH9이었다. 이 강을 본 실험에서 사용한 내마모시험에 적당하도록 직경이 약 6.3mm, 두께가 약 1.6mm가 되도록 disk 형태로 가공하였다. 이 시편들을 1230°C에서 30 분간 용체화 처리한 후 각각 690, 630, 530°C에서 tempering하였다. 이렇게 tempering온도를 변화시켰을 때의 경도는 각각 HRC50, 57, 65이었다. 이 시편들을 diamond compound 1 um까지 사용하여 표면을 연마하였다.

이 시편을 한국AIP센터에서 arc ion plating 방법으로 TiN을 코

팅하였다. 코팅의 성능을 결정하는 여러 인자들을 조절하여 코팅한 다음, scratch test를 통하여 접착성능이 가장 우수하다고 판단되는 조건으로 모든 시편을 코팅하였다. 코팅층의 두께는 주로  $2.3\mu\text{m}$ 가 되도록 하였으나, 코팅층의 두께가 내마모성능에 미치는 영향을 관찰하기 위하여  $1\mu\text{m}$ ,  $3\mu\text{m}$ 로 변화시키기도 하였다.

마모시험은 이른바 ball-on-three-flat 방법으로 하였다. 상대재료로는 TiN보다 경도가 약간 큰 알루미늄, 경도가 작은 베어링용 강으로 하였다. 윤화유로는 paraffin oil을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 고속도강에 코팅된 TiN의 표면을 보여 주는 SEM 사진이다. 일부 hole들이 관찰되고 있으나, 전반적으로 보아 표면 상태가 양호하다. 표면 거칠기를 surface profilometry로 측정한 결과에 의하면, 표면거칠기는 모재의 경도에 관계 없이 약  $0.05\mu\text{m}$ 이었다. Fig. 2는 코팅된 시편의 파단면을 보여 주는 SEM 사진이다. 코팅층 내부에는 기공이 전혀 발견되지 않고 있으며, 또 코팅층과 모재는 치밀하게 접착되어 있는 것으로 보인다. 고속도강 내부에는 일부 탄화물 입자들이 보이기도 한다. Fig. 3은 cross section을 보여 주는 TEM 사진이다. 코팅층이 모재에 치밀하게 접착되어 있음을 분명하게 보여 준다. 코팅층은, TEM 회절사진을 볼 때 microcrystallite로 구성되어 있었다.

Fig. 4는 경도가 HRC57인 모재에  $2.3\mu\text{m}$ 의 두께로 코팅한 시편을 알루미늄으로 각각 300, 400, 500N의 하중을 사용하여 미끄럼시험하였을 때의 미끄럼 시간에 따른 마모흔적의 직경(wear scar diameter)의 변화를 보여 주는 그림이다. 가로축이  $\log(\text{sliding time})$ 이며 세로축이  $\log(\text{wear scar diameter})$ 이다. 비교를 위하여 코팅하지 않은 시편을 500N으로 마모시험하였을 때의 마모데이터도 함께 나타내었다. 먼저 코팅하지 않은 시편에 비하여 코팅한 시편에서의 마모가 훨씬 작다. 이는 코팅에 의하여 내마모성능이 크게 향상됨을

의미한다. 또, 코팅하지 않은 시편에서는 마모데이터를 나타내는 직선의 기울기가 미끄럼 시간에 따라 변하지 않고 있으나, 코팅한 시편에서는 직선의 어느 미끄럼 시간 후에 변하고 있다. 즉 마모속도가 어느 미끄럼 시간 후에 빨라 지고 있다. 그리고 마모속도가 빨라지기 시작하는 시점은 하중이 클 수록 일찍 도달된다.

코팅한 시편에서 마모데이터를 나타내는 직선의 기울기가 어느 미끄럼 시간 후에 변하는 것은 마모가 일어나는 기구(mechanism)가 달라지는 것을 의미한다. 이와 같이 마모기구가 달라지는 것을 마모천이라고 칭한다. 마모기구가 어떻게 달라지는지를 확인하기 위하여, 마모천이 일어나기 전 즉 기울기가 달라지기 전과, 마모천이 일어난 후 즉 기울기가 달라진 후의 마모흔적을 관찰하였다.

Fig. 5는 마모천이 일어나기 전의 마모흔적을 보여 주는 SEM 사진이다. 마모흔적은 마모되지 않은 부위보다도 더 매끄럽게 보인다. 자세히 보면 일부 scratch들이 형성되어 있다. Surface profilometry로 표면을 조사한 결과 마모흔적은 마모되지 않은 부위에 비하여 움푹 들어가 있었다. 이상으로부터 마모는 scratch의 형성에 의하여 서서히 일어나는 것으로 보인다. 경도가 코팅층보다 큰 알루미늄의 표면에 존재하는 미세한 돌기들에 의하여 코팅층이 갈림에 따라 마모가 진행되는 것으로 보인다.(하중 25g으로 Vickers 경도를 측정한 결과 알루미늄의 경도가 TiN코팅층의 경도보다 약간 큰 것으로 나타났다.)

한편, Fig. 5에서 볼 수 있는 것 처럼, 마모된 부위에는 마모되지 않은 부위에서 볼 수 있었던 hole(Fig. 1)들이 관찰되지 않고 있다. 이는, 이러한 hole들이 코팅층의 내부에는 존재하지 않고 코팅층의 표면에만 존재한다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 반면에 마모천이 일어난 후의 마모흔적을 보여 주는 SEM 사진이다. 마모천이 일어나기 전과는 달리 마모흔적의 중앙 부근에 모재가 드러나 있다. 또 모재가 아직 드러나지 않은 마모흔적의 가장자리에도 scratch들이 분명하게 보인다. 이와 같이 어느 미

끄럼 시간 후에는 모재가 드러남에 따라, 중앙부분의 모재와 가장자리의 코팅층이 동시에 마모된다. 코팅층보다 내마모성이 약한(Fig. 4) 모재가 동시에 마모되기 때문에, 마모천이가 일어나기 전에서 코팅층만이 마모될 때에 비하여, 마모속도가 빨라지는 것이다.

이상에서 볼 때, 고속도강에 TiN을 코팅하여 알루미늄으로 마모시험할 때의 마모는 다음과 같이 일어난다. 처음에는 코팅층에 비하여 경도가 큰 알루미늄에 의하여 TiN 코팅층이 갈림에 따라 마모가 서서히 진행된다. 어느 임계 마모시간 후에 TiN 코팅층이 다 갈리어 코팅층보다 내마모성이 약한 모재가 드러나면 마모속도가 빨라진다. 코팅하지 않은 시편에서 마모를 나타내는 직선이, Fig. 4에서 보는 것 처럼, 하나의 기울기를 가지는 직선으로 나타나는 것은 처음부터 모재가 마모되며 이 기구가 변하지 않기 때문이다.

경도가 다른 모재에 텅하였을 때의 마모도 같은 양상이었다. Fig. 7은 모재의 경도가 서로 다른 시편들에 대하여 300N의 하중을 사용하여 마모시험하였을 때의 마모데이터이다. 모재의 경도에 관계 없이 마모천이가 일어나는 시점이 같다. 이는, 코팅층이 갈리는 현상이 코팅층의 물리적인 성질에만 의존할 뿐, 모재의 경도에는 관계가 없음을 의미한다.

Fig. 8은 코팅층의 두께를 각각 1, 2.3, 3 $\mu$ m로 변화시켰을 때 미끄럼 시간에 따른 wear scar diameter의 변화를 보여 주는 것이다. 코팅층의 두께가 두꺼울 수록 마모천이가 늦게 일어난다. 이는, 코팅층의 두께가 두꺼울 수록 코팅층이 갈리어 모재가 드러날 때까지의 시간이 더 많이 걸리기 때문이다. 이 결과로 미루어 경도가 코팅층보다 큰 재료에 대하여 미끄럼 운동을 할 때는 코팅층의 두께가 클 수록 내마모성능이 좋다고 할 수 있다.

Fig. 9는 마모천이가 일어나기 전 시편의 마모흔적을 cross section하여 모재를 관찰한 TEM 사진이다. 마모되지 않은 부위(Fig. 3)에서와는 달리 많은 쌍정(twin)들이 관찰되었다. 이는 마모시 모재에 심한 소성변형이 일어남을 보여 주는 증거이다.

Fig. 10은 알루미늄으로 마모시험하였을 때의 미끄럼 시간에 따른 마찰계수의 변화를 보여 주고 있다. 마찰계수는 약 0.1이었고, 이 값은 마모천이가 일어나 모재가 드러난 후에도 변화가 없었다. 모재의 경도나 코팅층의 두께가 변하거나 하중이 다를 때에도 이 마찰계수는 변화가 없었다.

지금까지 코팅층보다 경도가 큰 알루미늄에 대하여 미끄럼 운동할 때의 마모기구에 대하여 설명하였다. 이 경우에는 코팅층이 알루미늄에 의하여 갈림에 따라 마모가 서서히 진행되다가, 모재가 드러난 후에는 모재의 마모가 일어나기 때문에 마모속도가 빨라진다. 한편, 코팅층보다 경도가 작은 재료에 대하여 미끄럼 운동할 때의 마모현상을 규명하기 위하여 베어링용 steel을 사용하여 마모시험하였다. 이 베어링용 steel의 경도는 HRC63으로 이 값을 Vickers 경도값으로 환산하면 약 770으로 코팅층의 Vickers 경도값 대략 1300 이상에 비하여 훨씬 작다. 이와 같이 경도가 작은 steel로 미끄럼 마모시험할 때에는, 경도가 큰 알루미늄으로 마모시험하였을 때와 같이 코팅층이 갈리는 현상이 일어나기를 기대하기 어렵기 때문에, 마모기구가 알루미늄으로 마모시험할 때와는 다를 것으로 예상된다.

Fig. 11은 알루미늄으로 마모시험할 때보다도 훨씬 큰 하중인 2000N의 하중을 사용하여 400분간 마모시험하였을 때의 마모흔적을 보여 주는 사진이다. 코팅층이 그대로 존재하고 있음을 보여 주고 있다. 코팅층의 경도가 steel의 그것보다 크기 때문에 코팅층이 갈리는 현상이 일어나지 않기 때문이다. 이 경우에는 경도가 낮은 steel의 마모가 심하였다. Fig. 11에서 마모흔적의 모양이, 알루미늄으로 마모시험하였을 때와는 달리, 원형이 아니고 타원형에 가까운 것은, steel ball의 마모가 심하게 일어나기 때문에 발생하는 현상이다.

위 결과는 경도가 작은 steel로 마모시험할 경우에는 코팅층이 갈리는 현상이 일어나지 않기 때문에 마모가 거의 일어

나지 않음을 의미하는 것이다. 코팅층보다 경도가 큰 알루미늄으로 마모시험할 때에 비하여 하중이 매우 클 경우에도 마모는 거의 일어나지 않는다. 오히려 steel ball의 마모가 심하게 일어나며, 이에 따라 접촉면적이 넓어지는데, 따라서 접촉압력이 작아지게 되어 코팅층은 파손되지 않고 그대로 존재한다.

Fig. 12는 2000N의 하중을 사용하여 마모시험하였을 때의 미끄럼 시간에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 모식적 그림이다. 마모시험을 시작한 후 약 1분간에는 마찰계수가 약 0.13이었으나, 그 후 약 0.1로 감소하였으며, 그 이후 계속 이 값을 유지하였다. 마모시험을 어느 시간 동안 계속한 후 steel ball만을 바꾸어 계속 마모시험하면 다시 약 1분간 0.13정도의 마찰계수를 보였고 그 후 다시 0.1정도로 감소하여 그 이후 계속 이 값을 유지하였다. 이로 미루어 마모시험 시작 후 약 1분간 마찰계수가 큰 이유는 steel ball의 표면에 존재하는 돌기들이 제거되는 이른바 running-in이 일어나기 때문이라고 판단된다.

Fig. 13은 더욱 더 큰 하중인 3000N을 사용하여 350분간 마모시험하였을 때의 마모흔적을 보여 주는 사진이다. Steel ball의 마모로 인한 접촉면적의 증가로 접촉압력이 저하되기 때문에, ball을 매 30분 마모시험한 후 새 것으로 바꾸어 마모시험을 계속하였다. 이 하중에서도 초기에는 코팅층이 파손되지 않고 그대로 존재하였다. 그러나 어느 미끄럼 시간 후, Fig. 13에서 볼 수 있는 것 처럼, 코팅층이 갑자기 벗겨졌다.

Fig. 14은 3000N의 하중을 사용하여 steel ball로 마모시험하였을 때의 미끄럼 시간에 따른 마찰계수의 변화를 보여 주는 것이다. 마모시험 후 약 1분간의 이른바 runnin-in 동안에는 마찰계수가 약 0.13이었고, 이후 코팅층이 벗겨지기 전까지는 약 0.1로 일정하였으나, 코팅층이 벗겨짐과 동시에 이 값은 크게 증가하였다. 이는 표면과 표면이 서로 달라 붙는 이른바 seizure 현상이 일어날 때의 전형적인 마찰거동과 같은 것이다.

즉 일단 코팅층이 벗겨지면 모재와 steel ball 사이에 seizure가 일어나는 것으로 보인다.



Fig. 1. Typical microstructure of surface of TiN coating.

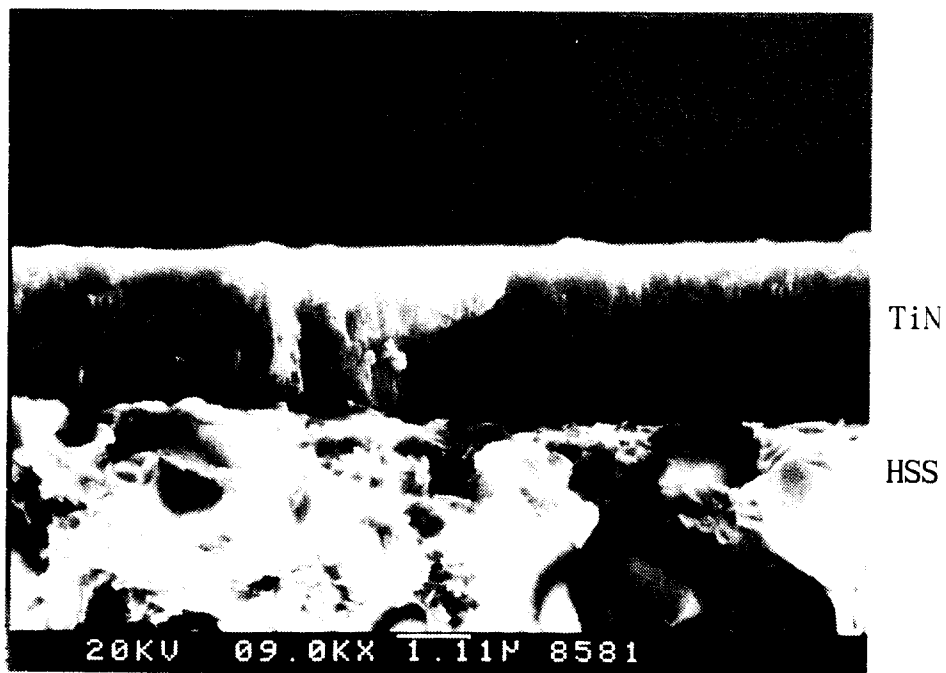


Fig. 2. Fracture surface showing cross section of coating.



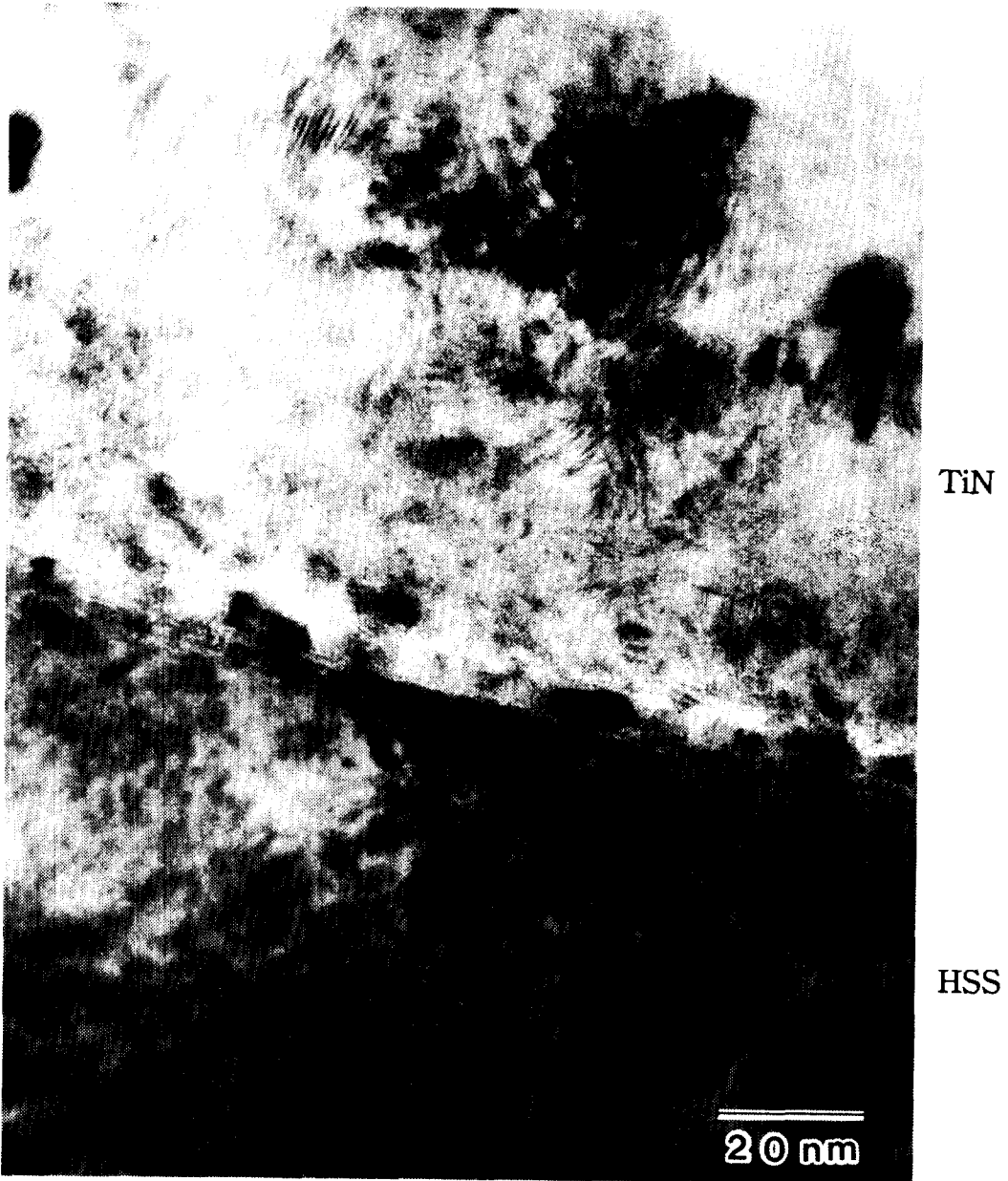


Fig. 3. TEM microstructure of cross section in the coated specimen.

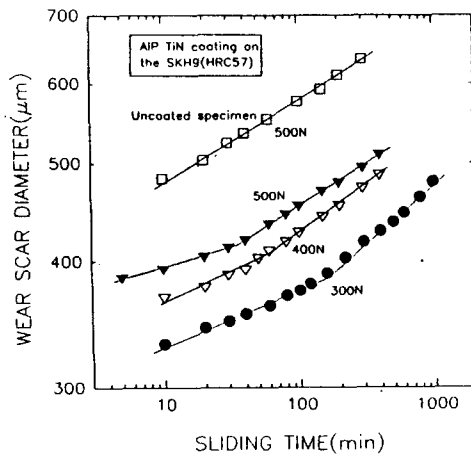


Fig. 4 . Change of wear scar diameter of HRC57 specimen as a function of sliding time.

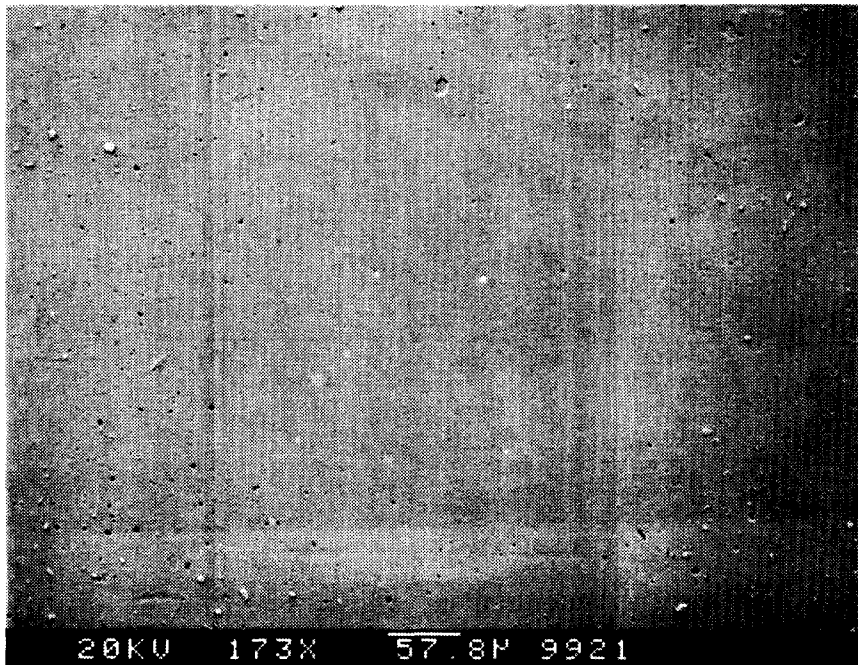


Fig. 5. Microstructure of worn surface before wear transition.

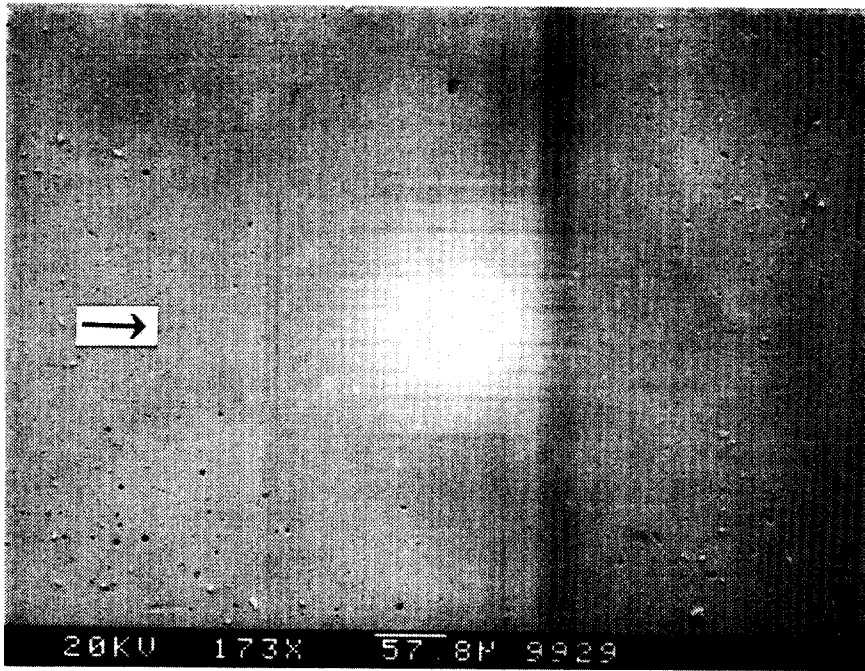


Fig. 6. Microstructure of worn surface after wear transition.

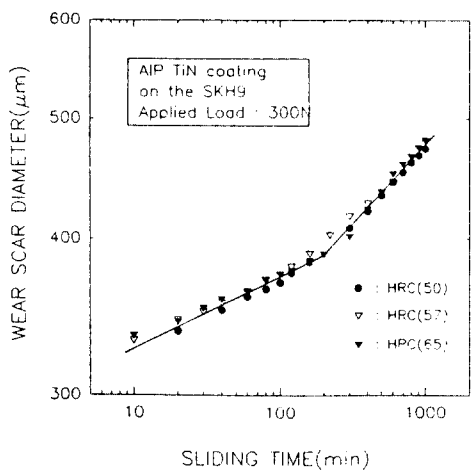


Fig. 7. Change of wear scar diameter for specimens of various substrate hardness as a function of sliding time under 300N of load.

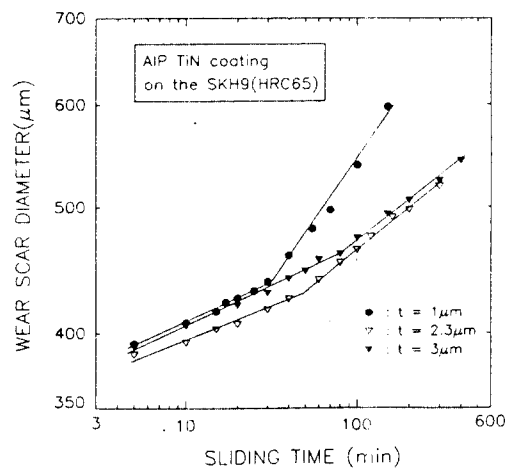


Fig. 8. Change of wear scar diameter for specimens of various coating thickness as a function of sliding time under 500N of load.

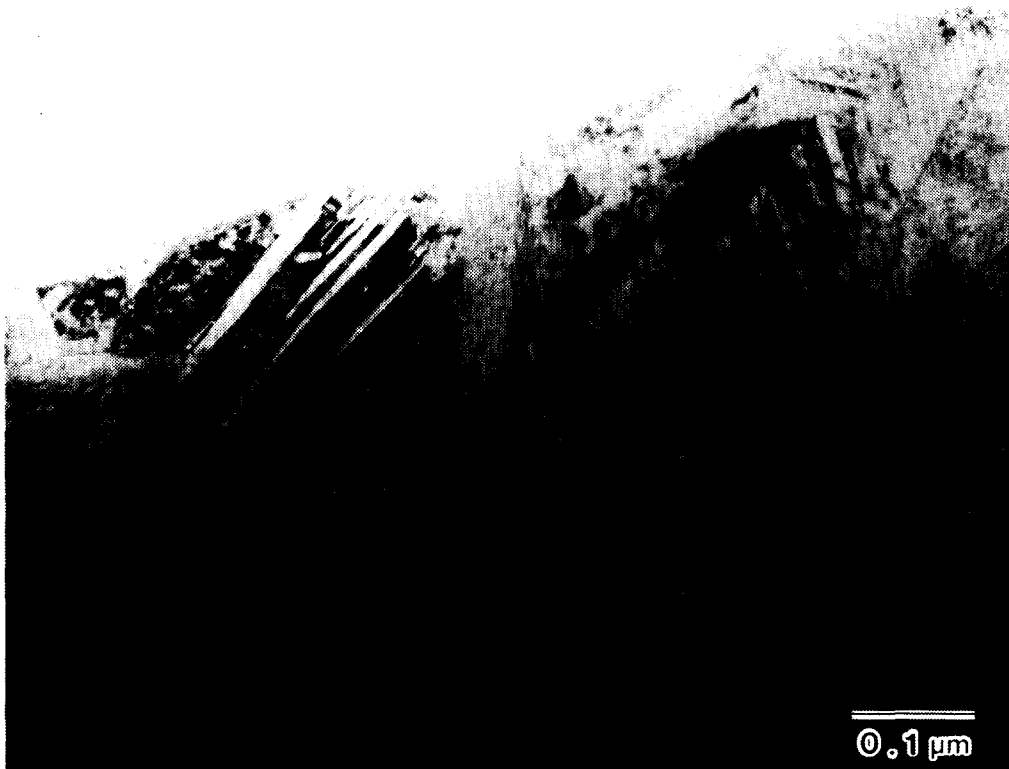


Fig. 9. TEM microstructure of substrate (cross section) beneath the worn surface showing twin formation during sliding in substrate.

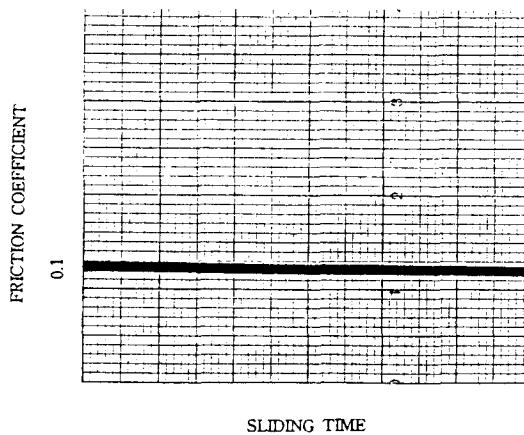


Fig. 10 Typical change of friction coefficient of coated specimen during sliding with alumina as a function of sliding time.

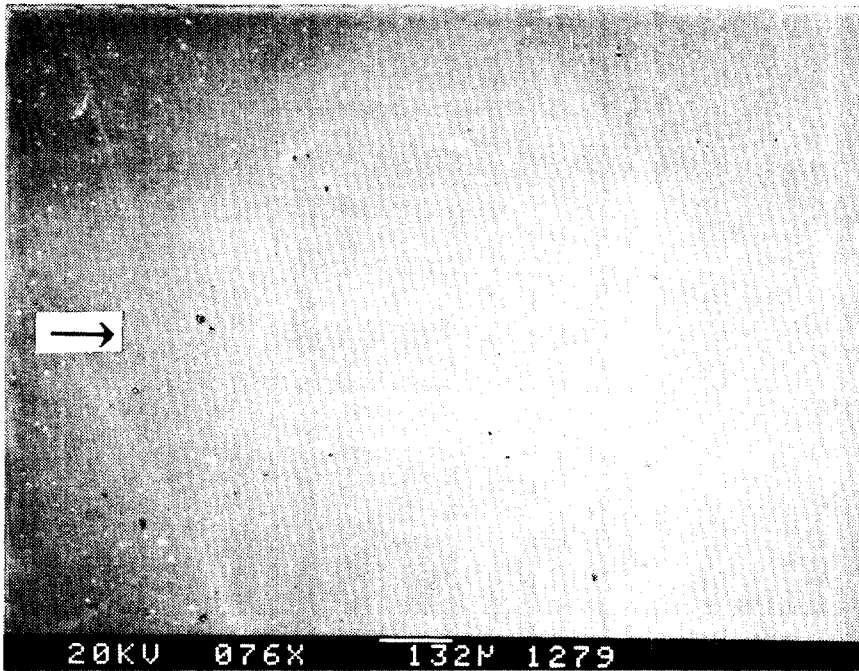


Fig. 11. Microstructure of worn surface after sliding for 400min against steel ball under 2000N of load.

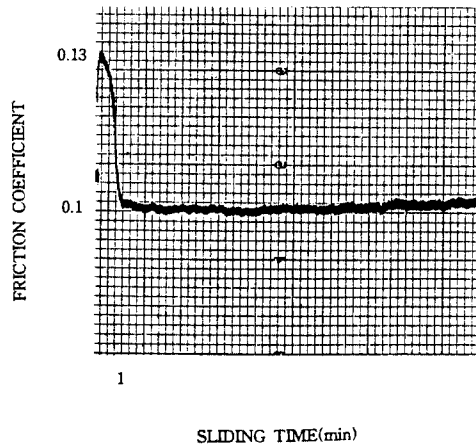


Fig. 12. Typical change of friction coefficient during sliding against steel ball.

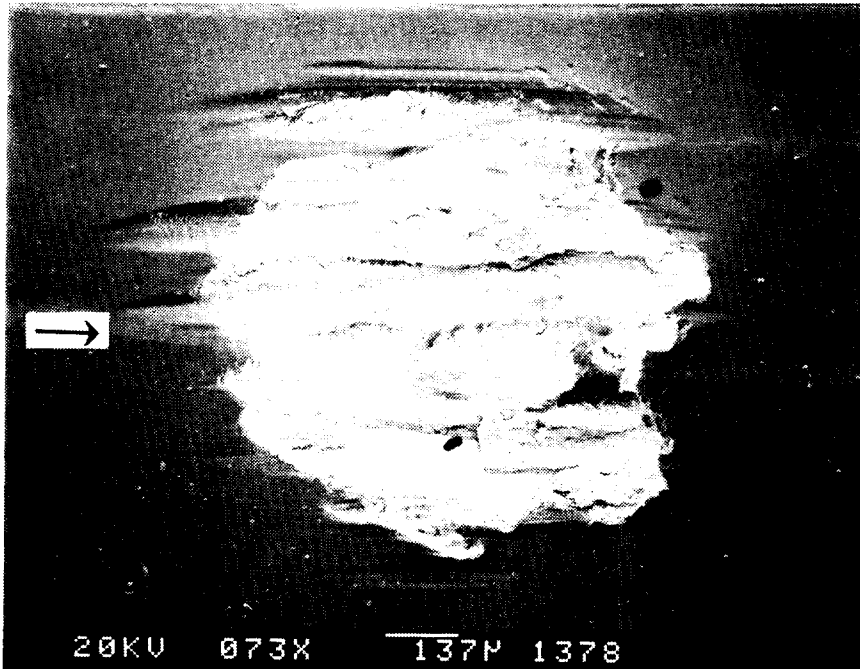


Fig. 13. Microstructure of worn surface after sliding for 350min against steel ball under 3000N of load.

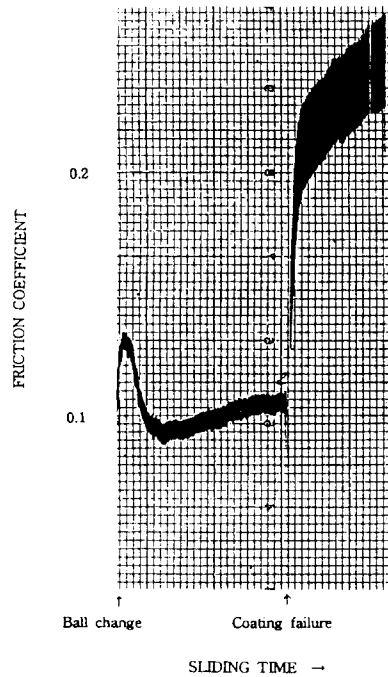


Fig. 14. Change of friction coefficient during sliding against steel ball under 3000N of load. Note the sharp increase of friction coefficient with the coating failure.