

〈論 文〉

TiN 박막을 코팅한 드릴의 수명향상에 관한 연구

김홍우* · 김문일**

(1992년 8월 18일 접수)

A Study on the Life Enhancement of TiN Coated Drill

Hong Woo Kim and Moon Il Kim

Key Words : Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition(플라즈마 화학 증착법), Magnetron Sputtering(마그네트론 스퍼터링), Interlayer(중간층), Adhesion(밀착력), Roughness(조도)

Abstract

Recently, various film coated insert tools have been used in order to improve tool life by several different vapor deposition or chemical vapor deposition. Especially, TiN coated drills have been broadly studied because of improving drill performance in terms of drill life, work quality and its brilliant color. Nevertheless, because of the poor adhesion between TiN film and drill, it was difficult to attain the better drill performance. Therefore, to improve adhesion of TiN films, we sputtered titanium as interlayer prior to TiN deposition on drill by PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). The results indicate that Ti/TiN coated drills achieve about 2.6 times life improvement, while TiN coated drills only 2 times. Wear characteristics of tested drills were examined using SEM, and the results were correlated with drill life and roughness of drilled holes.

1. 서 론

플라즈마 화학 증착법(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)에 의하여 증착된 TiN 박막은 용점이 높고, 전기적 성질이 우수하며, 높은 경도와 화학적 안정성 때문에 반도체 산업 및 내마모, 내부식성 재료로 응용하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다.^(1~3) TiN을 피복하여 절삭공구의 수명증가를 위한 연구는 실용화 되고 있으나, TiN 박막과 모재와의 밀착특성 문제로 밀착력 향상에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.^(3~9)

Greene등⁽⁴⁾은 계면의 화학조성이 모재와 박막사

이의 밀착력에 큰 영향을 미친다고 보고하였으며, 또한 모재의 온도를 높여 성분 원소를 모재내부로 확산시키는 방법,⁽⁵⁾ 모재에 bias전압을 가하여 높은 에너지를 가진 원자를 모재표면에 충돌시켜 혼합시키는 방법,⁽⁶⁾ 스퍼터 에칭(sputter etching)으로 불순물과 표면 산화물을 제거하거나, 표면의 형상을 변화시키는 방법⁽⁷⁾ 및 중간층 형성으로 밀착력을 향상시키는 방법⁽⁸⁾등이 연구되고 있다.

특히 김홍우, 김문일⁽⁹⁾은 SKH9위에 TiN박막을 코팅할때 중간층으로 TiN박막과 모재와 상호 반응성이 있는 Ti를 선택하여, 이 Ti 중간층의 두께를 변화시켜 박막의 밀착력 변화를 연구한 결과, Ti 중간층의 두께가 약 0.2 μm 일때 좋은 밀착력을 나타낸다고 보고한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 드릴(SKH9종)에 스퍼터

*정회원, 단국대학교 기계공학과

**연세대학교 금속공학과

링법으로 Ti 중간층을 약 $0.2 \mu\text{m}$ 의 두께로 코팅한 후, 그 위에 플라즈마 화학증착법으로 TiN 박막을 코팅한 드릴로 드릴링 시험을 행하여 수명을 평가하였으며, 드릴의 내마멸성 및 드릴링한 구멍 내면의 조도를 코팅하지 않은 드릴 및 TiN 코팅한 드릴과 비교함으로써 Ti/TiN 코팅처리에 의한 공구 성능 및 수명향상 효과를 평가하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시편 준비

본 실험에서 모재로 사용한 드릴은 시판되는 독일 Guhring Co.의 직경 2 mm인 DIN338로서 원자흡수 분광법(Atomic Absorption Spectrometry)으로 측정된 화학조성은 Table 1과 같으며, 이는 KS규격으로 고속도 공구강인 SKH9에 해당한다.

또한 Pin-on-Disk type의 마모 시험기로 마찰계수를 측정하기 위한 시편으로는, 드릴과 동일한 조성을 가진 직경 6 mm, 높이 15 mm인 pin형태의 SKH9으로 드릴과 같은 경도로 맞추기 위해, 진공 관상로에서 1200°C 에서 1시간 가열한 후 켈칭하고 550°C 에서 1시간 템퍼링 처리를 행하여 HRC 64 ± 2 의 경도를 얻었다. 이와같이 열처리한 시편을 SiC연마지로 #2000 까지 연마한 후, 드릴의 경우와 같은 방법으로 알콜 및 아세톤 용액중에서 초음파 세척을 행하여 표면의 불순물을 제거 청정하였다.

2.2 증착실험

본 실험은 2단계 증착을 행하였으며, 먼저 DC Magnetron sputtering 장치(Fig. 1)로 Ti 중간층을 코팅하고, 플라즈마 화학증착법으로 TiN 박막을 증착하였다.

Ti를 증착할 때 모든 시편에 대해서 스퍼터링 시간을 동일하게 2분30초로 고정하여 약 $0.2 \mu\text{m}$ 로 중간층을 증착하였고, TiN 박막은 플라즈마 화학증착장치(Fig. 2)를 이용하여 500°C 에서 2시간 증착하여 약 $1.2 \mu\text{m}$ 로 두께를 일정하게 유지시켰다.

Table 1 Chemical composition of substrate(wt.%)

Composition	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Fe
DIN338(SKH9)	0.86	0.33	0.34	4.16	4.86	5.70	1.75	bal.

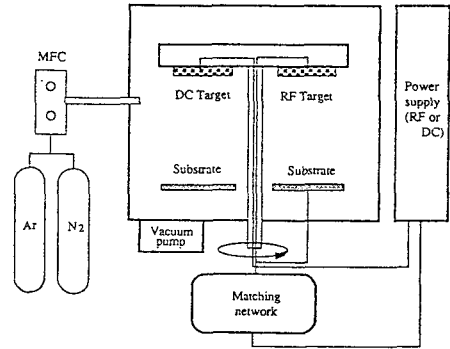


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus for Ti coating (Reactive magnetron sputtering system)

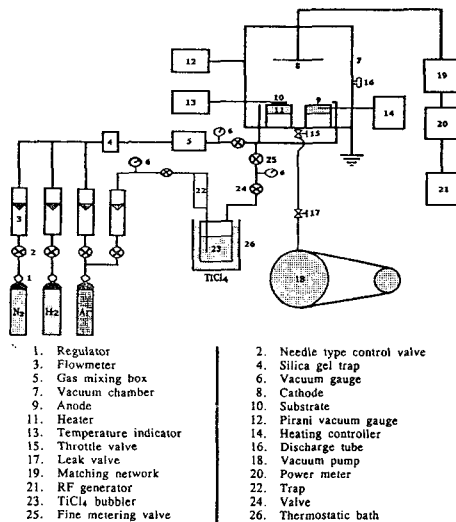


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus for TiN coating (Plasma enhanced chemical vapor deposition system)

2.3 마찰 계수 측정

마찰 계수 측정에 사용된 마모시험기는 Pin-on-Disk type(Wazau Co., Tribometer, SST type)이며, 마모 시험기의 개략도와 시험조건을 Fig. 3에 나타내었다. 이때 disk의 회전속도는 100 rpm, 하중 7 N으로 상온하에서 5분동안 마모시험을 행하여 마찰 계수의 변화를 측정하였다.

2.4 드릴링 시험

탁상 드릴링 머신(brillling machine, Kitagawa Co.)으로 절삭속도 17.7 m/min.(2820 rpm), 이송속도(feed rate)를 0.008~0.043 mm/rev.인 조건하

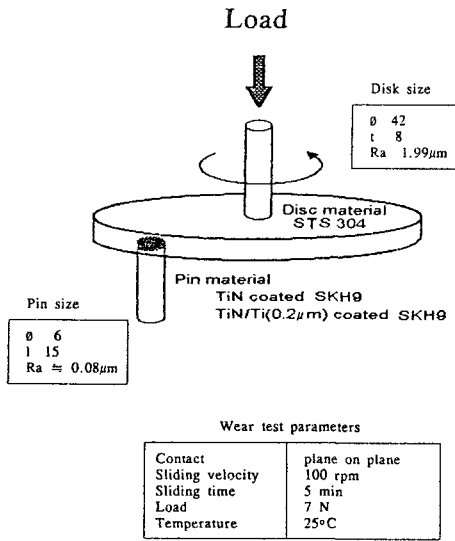


Fig. 3 Schematic diagram of wear tester and test parameters

에서 냉각제로써 수용성 절삭유(W1종 1호)를 사용하여 코팅하지 않은 드릴, TiN과 Ti/TiN을 코팅한 드릴의 수명을 비교 평가하였다.

이때 피삭재로는 두께가 8 mm인 SCM440(KS규격)판재를 준비하여 870°C에서 퀸칭을 행한 후, 각각 250°C, 450°C, 600°C에서 템퍼링 처리를 행하여 경도를 HRC 24.7, 31.9, 40.3인 3종류의 피삭재로 만들고 이에 대해 드릴링 시험을 행하였다.

드릴의 수명은 chisel edge 부위가 무디어져서 더 이상 드릴링을 할 수 없을때 까지의 드릴링한 hole 수로 결정하였다.

2.5 드릴의 주사 전자 현미경 관찰

코팅하지 않은 드릴, TiN 및 Ti/TiN을 코팅한 드릴에 대해 드릴링시험을 행한 후 주사 전자 현미경(JEOL, 35CF)으로 드릴의 마모상태를 비교 관찰 하였다.

2.6 피삭재 구멍내면의 조도 시험

피삭재 구멍내면의 조도 변화를 측정함으로써 코팅하지 않은 드릴과 TiN 및 Ti/TiN 박막을 증착한 드릴의 가공성능을 비교 평가하였다.

드릴시험이 완료된 피삭재는 구멍에 수직 방향으로 절단한 후 아세톤 용액속에서 초음파 세척을 행하여 KS B0161 규정에 따라 구멍내면의 조도를 측정하였다. 이때 사용한 조도 시험기는 Japan

Kosaka Roughness Tester(model SE-3A, EF-12)이었으며, 이때 조도는 최대조도(R_{max})를 기준으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰계수 측정

Pin-on-Disk type 마모시험기로 TiN박막을 증착한 시편과 Ti/TiN을 증착시킨 시편에 대해서 disk의 회전수에 따른 마찰계수의 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

TiN이 코팅된 시편은 초기에 0.3~0.4의 마찰계수를 보이며, 약 30회 회전 후에는 급격히 증가하여 0.8로 나타났다. 이것은 TiN코팅층의 마모에 의해서라기 보다는 코팅층이 모재로부터 박리된 것에 기인된 것으로 생각된다.

반면, Ti/TiN의 경우는 약 110회 회전에서 마찰계수의 큰 변화가 관찰되는 것으로 미루어 TiN을 코팅한 경우보다 모재와의 밀착력이 향상되었음을 확인 할 수 있다. 이것은 Ti 층위에 플라즈마 화학 증착법으로 TiN을 증착할 때 TiN코팅층내의 질소가 Ti 중간층내로 확산하여 interfacial diffusion zone(계면확산층)이 형성되어 TiN코팅층과 모재간의 갑작스런 구조 변화를 완화시키고 계면의 응력집중을 감소시켜 밀착력이 향상된 것으로 사료되며, 이것은 여러 연구자들에 의한 밀착력 시험(scratch adhesion test)결과와도 잘 일치하고 있다.^(2,9)

3.2 드릴링 시험

Fig. 5는 경도가 HRC 24.7인 피삭재에 대해서 이송속도 0.019 mm/rev., 절삭속도 17.7 m/min.인 조건에서 3종류의 드릴로 드릴링 시험을 행한 결과를 작업 hole수로 나타낸 것이다.

코팅하지 않은 드릴은 평균 291 hole을 뚫은 반면 TiN을 코팅한 드릴은 585 hole, Ti/TiN의 경우에는 764 hole로서, 각각 약 2배와 2.6배의 수명 향상 효과를 나타내었고, 또한 Fig. 6과 같이 피삭재의 경도가 HRC 31.9인 경우에도 비슷한 양상을 나타내었다. 이때 Ti/TiN코팅을 한 드릴이 TiN 코팅한 드릴보다 약 30%의 수명이 향상되고 있다. 이로 미루어 드릴에 TiN 코팅시 Ti중간층이 밀착력을 향상시키는 효과가 있음을 다시한번 입증해 주고 있다.

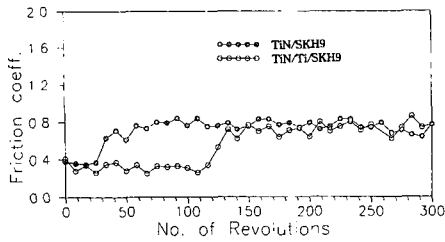


Fig. 4 Friction coefficient vs. number of revolutions

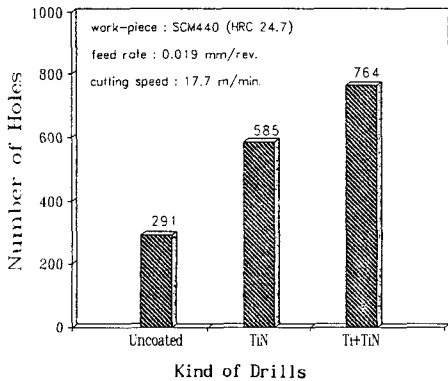


Fig. 5 Results of drilling test with SCM440 workpieces (HRC 24.7)

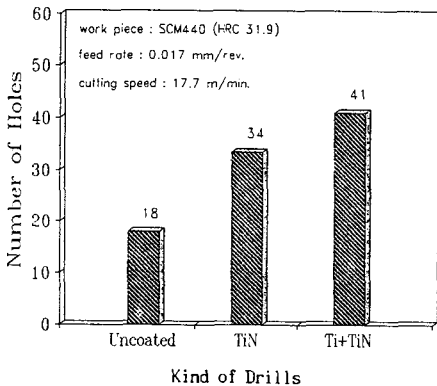


Fig. 6 Results of drilling test with SCM440 workpieces (HRC 31.9)

그러나 경도가 HRC 40.3인 피삭재에 대해서는 3종류 드릴의 수명이 10 hole이하로 거의 차이가 없었다. 이것은 Fig.12에서 나타난 것과 같이 피삭재의 높은 경도 때문에 드릴의 chisel edge마모가 급격히 발생하여 수명향상 효과가 없는 것으로 생각된다.

본 실험의 결과와 TiN 코팅드릴을 생산하고 있

Table 2 The comparison of this study and Guhring's results as a total cutting distance in drilling test (unit : m)

	Uncoated Drill	TiN coated Drill	Performance
This study	2.3	4.7(6.0*)	200% (260%*)
Guhring Co.	2.5	9.0	360%

* Ti/TiN coated drill

<drilling condition>

This study : drill dia.;2 mm, feed rate;0.019 mm/rev., cutting speed : 17.7 m/min. workpiece : SCM440 (HRC24.7), film thickness : 1.2 μm, deposition method : PECVD

Guhring Co. : drill dia. ; 8 mm, feed rate ; 0.08 mm/rev., cutting speed : 14 m/min. workpiece : SCM440 (HRC31) film thickness : 2~3 μm, deposition method : ion plating

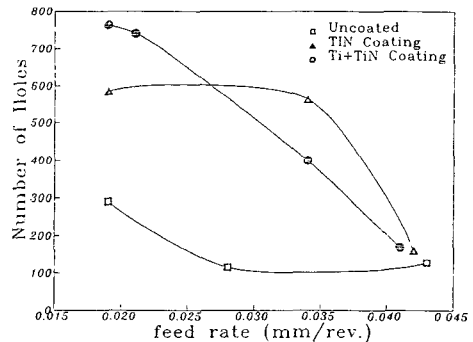


Fig. 7 Number of drilled holes vs. feed rates in drilling test (workpiece : SCM440 (HRC 24.7), cutting speed : 17.7 m/min.)

는 독일 Guhring Co.에서 제시한 결과⁽¹⁴⁾를 비교하기 위해서 Table 2에 나타내었다.

Guhring Co.의 코팅하지 않은 드릴과 TiN 코팅 드릴의 총 절삭길이가 각각 2.5m, 9m로서 TiN을 코팅하므로써 드릴의 수명이 3.6배 향상된 것과 비교할 때, 본 실험 결과는 차이를 나타내고 있으나, 이와 같은 차이는 코팅층의 두께, 증착방법 및 드릴링 조건이 다르기 때문이라고 생각된다.

한편 피삭재의 경도가 HRC 24.7 일때 이송속도

에 따른 hole수의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 전반적으로 3종류 드릴 모두 이송속도가 증가함에 따라 작업 hole수가 감소하는 경향을 나타내었으며, 특히 Ti/TiN코팅을 한 경우에 그 정도가 심하였다.

따라서 이송속도가 약 0.025 mm/rev. 이하에서는 Ti중간층에 의한 수명향상효과가 있으나, 그 이상의 이송속도에서는 수명향상이 나타나지 않음을 알 수 있다.

이와같은 결과는 본 연구에서 Ti중간층을 스퍼터링방법으로 증착할때 스퍼터된 Ti입자들의 flux 방향이 드릴의 측면과 수직이기 때문에 chisel

edge부위의 Ti중간층 코팅이 미흡하여, 이송속도가 약 0.025 mm/rev. 이상일때는 압축하중이 증가하여 Ti중간층에 의한 수명향상효과가 없는 것으로 사료된다.

3.3 드릴의 마모형상

일반적으로 드릴의 마모는 위치에 따라 크게 7가지로 구분된다. 드릴링시에 chisel edge에서 발생하는 마모, 압출된 재료의 이동에 의한 clearance surface에서의 압출마모, 드릴의 flute 표면에서 절삭 chip으로의 확산에 의한 crater마모, cutting lip을 따라서 발생하는 flank마모, margin부위에서

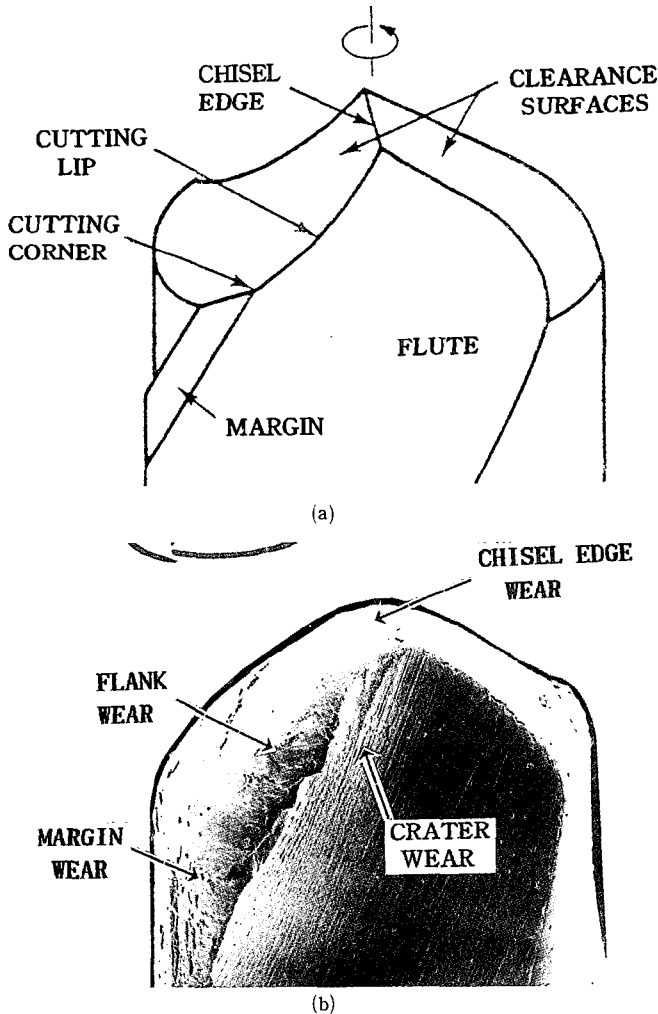


Fig. 8 (a) Schematic of a drill tip illustrating nomenclatures
 (b) SEM photograph of tested drill showing the types of wear observed on uncoated drills

의 margin마모, 그리고 cutting lip에서의 notching과 chipping으로 분류할 수 있다.^(10,11)

Fig. 8(a)에는 드릴의 형상과 각 부위의 명칭을 나타내었으며, Fig. 8(b)는 코팅하지 않은 드릴의 전형적인 마모형상으로서 본 실험에서는 크게 4종류의 마모를 관찰할 수 있다.

드릴링을 하지 않는 white드릴(uncoated drill)과 피삭재의 경도가 HRC 24.7, 이송속도 0.028mm/rev.인 조건하에서 공허 120hole의 드릴링 시험을 행한 3종류의 드릴에 대한 SEM사진을 Fig. 9에 나타내었다.

드릴링을 하지 않은 white드릴(A)과 비교할때

코팅하지 않은 드릴(B)은 chisel edge마모와 가장 절삭속도가 높은 cutting corner에서의 flank마모, margin마모 등이 많이 발생하나, TiN을 코팅한 드릴(C)은 약간의 chisel edge마모, flank마모, margin마모가 발생하는 것을 관찰할 수 있으며, 특히 Ti/TiN을 코팅한 드릴의 경우(D)는 거의 마모가 일어나지 않았다.

따라서 Ti중간층이 TiN의 밀착특성을 향상시켜 드릴의 내마모성을 향상시키는 것을 알 수 있으며, 이것은 앞의 마찰계수 측정 및 드릴수명시험 결과와 같은 경향을 나타내며, 여러 연구자들^(12,13)의 보고와도 일치하고 있다.

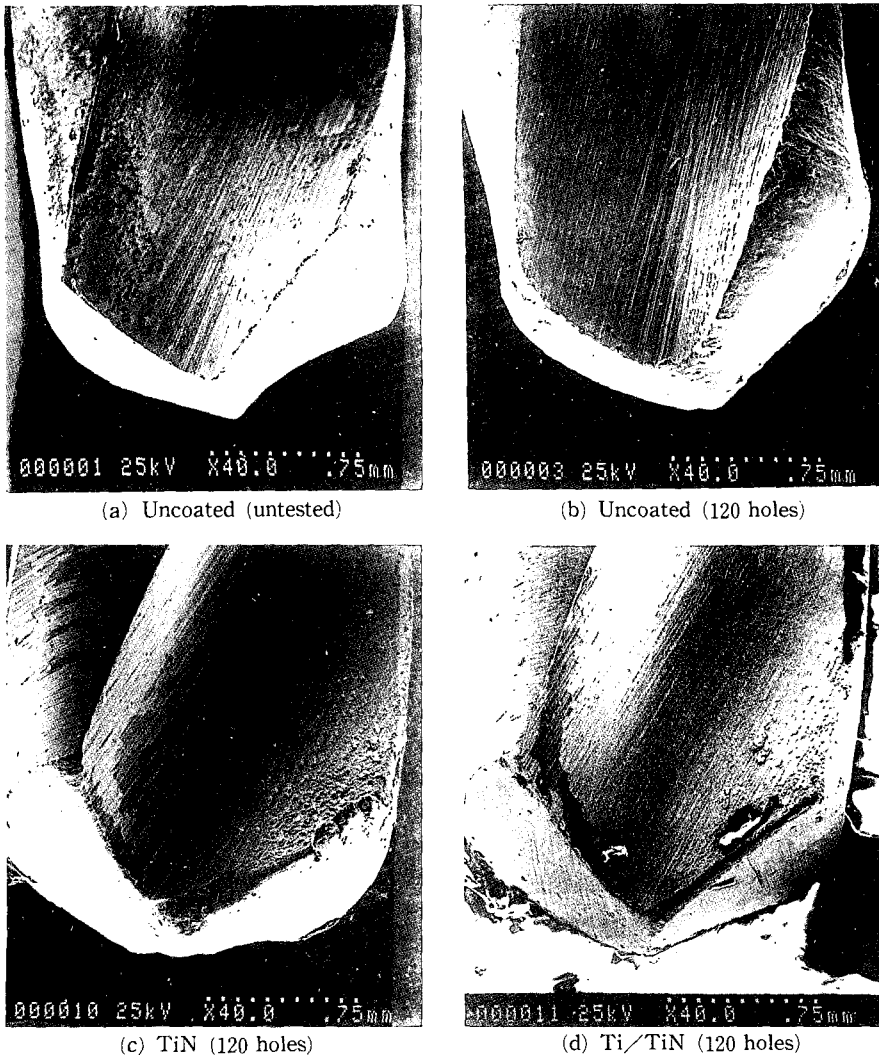
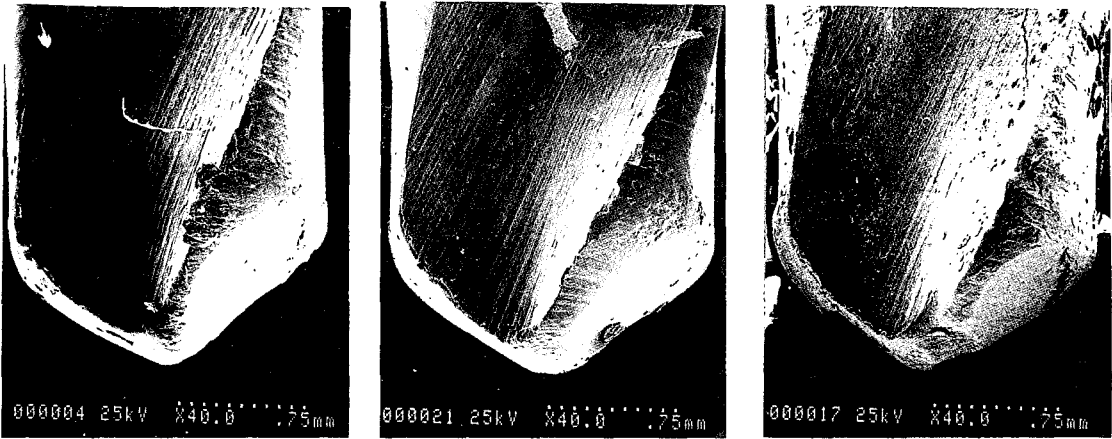


Fig. 9 SEM micrographs of untested and tested drills (workpiece harness:HRC 24, 7)

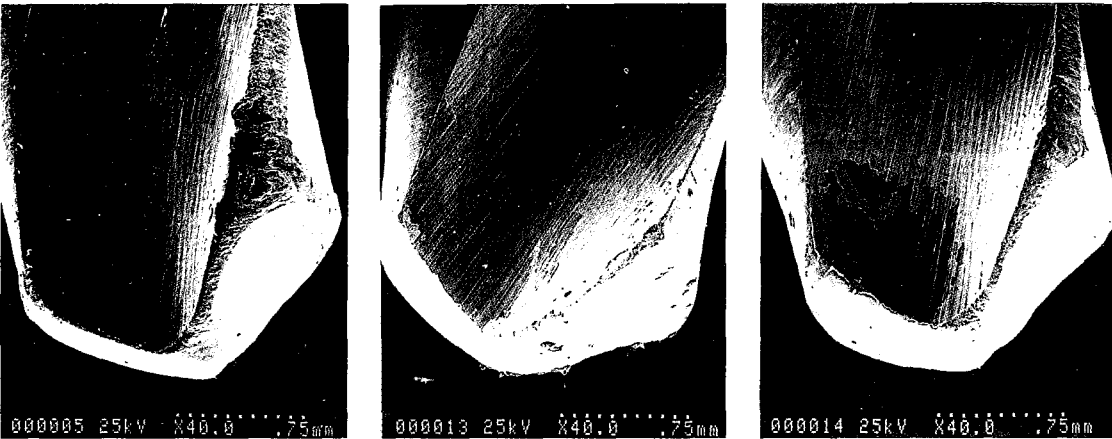


(a) Uncoated (147 holes)

(b) TiN (617 holes)

(c) Ti/TiN (854 holes)

Fig. 10 SEM micrographs of tested drills (workpiece hardness:HRC 24.7)



(a) Uncoated (23 holes)

(b) TiN (27 holes)

(c) Ti/TiN (41 holes)

Fig. 11 SEM micrographs of tested drills (workpiece hardness:HRC 31.9)



(a) Uncoated (14 holes)

(b) TiN (2 holes)

(c) Ti/TiN (13 holes)

Fig. 12 SEM micrographs of tested drills (workpiece hardness:HRC 40.3)

Fig. 10~12에서 경도가 각각 HRC 24.7, 31.9 및 40.3인 피삭재에 대해서 드릴링 시험을 행한 3 종류의 드릴을 SEM으로 관찰한 사진으로, 모든 드릴은 공히 chisel edge부분이 상당히 마모되어 더이상 절삭을 할 수 없는 상태이다.

Fig. 10은 피삭재의 경도가 HRC 24.7일 때 드릴의 마모상태를 나타낸 사진으로서 최대 hole수가 각각 코팅하지 않은 드릴의 경우 147, TiN을 코팅한 드릴은 617, Ti/TiN의 경우는 854 hole인 경우이며, 피삭재의 경도가 HRC 31.9, 40.3으로 증가했을 때의 마모상태를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 피삭재의 경도가 HRC 24.7과 31.9 일때는 드릴의 평균수명이 TiN을 코팅함으로써 2배, Ti/TiN을 코팅했을때는 2.6배 향상한 것과 비교할 때 드릴링 횟수가 증가함에 따라 chisel dege마모 및 cutting lip에서의 마모가 상당히 진행되었으며, 피삭재의 경도가 HRC 40.3에 대해서는 3종류의 드릴 모두 평균수명이 10 hole이하로서 공히 chisel edge부위의 마모가 주로 발생한 것을 알 수 있다.

3.4 피삭재 구멍내면의 조도 비교

Fig. 13에 HRC 24.7인 피삭재에 대해서 드릴링 시험을 행한 후 구멍을 따라 수직 절단한 피삭재의 단면사진과 이때 구멍내면에서의 조도(R_{max})를 측정된 결과를 나타내었으며, 이것을 Fig. 14에 그래프로 나타내었다.

코팅하지 않은 드릴의 경우에는 구멍내면의 조도가 50hole일 때 $27.5 \mu\text{m}$, 150일 때 $40 \mu\text{m}$ 이었으나, TiN을 코팅한 경우에는 50, 150, 600 hole에서 각각 17.5, 22.5, $30 \mu\text{m}$ 로 코팅하지 않은 경우보다 감소하였다.

특히 Ti/TiN을 코팅한 경우는 50, 150, 600 hole에서의 조도가 15, 17.5, $22.5 \mu\text{m}$ 로 TiN을 코팅한 경우보다도 감소하였으며, 850 hole의 조도가 $37.5 \mu\text{m}$ 로서 코팅하지 않은 드릴의 150 hole 드릴링시보다도 낮은 값을 나타내고 있다.

이와 같이 TiN, Ti/TiN 코팅한 드릴의 경우에 드릴링한 구멍내면의 조도가 향상되는 원인으로는, 경질 피삭재로 사용되는 TiN의 높은 경도와 화학적 안정성, 낮은 마찰계수에 기인되며, 또한 Ti/TiN코팅 드릴이 TiN코팅 드릴보다 높은 드릴링 hole수에서도 더 낮은 구멍내면의 조도를 갖는 것은 Ti중간층에 의한 TiN과 드릴간의 밀착력 향상

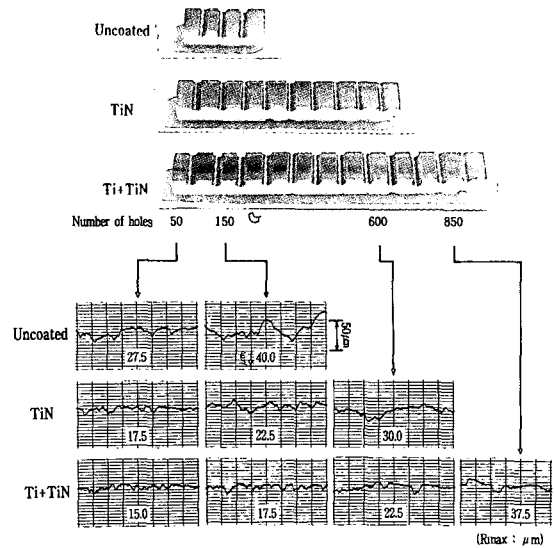


Fig. 13 Comparison between surface roughness obtained with untreated, TiN coated and Ti/TiN coated drills(workpiece:SCM440(HRC 24.7))

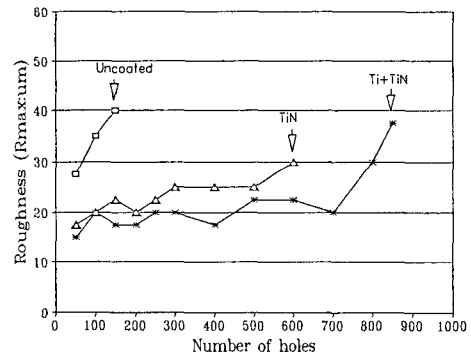


Fig. 14 Surface roughness vs. number of drilled holes

효과 때문인 것으로 생각된다.

향후에는 특히 드릴링시 발생하는 마모 및 파손을 최소화하며, TiN박막의 밀착력을 향상시키기 위한 중간층으로서 Ti뿐만 아니라, thermal barrier 역할도 함께할 수 있는 Al_2O_3 , TiC, Ti(C,N) 및 TiAlN을 포함한 다층 박막에 관한 연구도 고려되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

DIN388(SKH9)인 드릴에 TiN 및 Ti/TiN 코팅

을 하여 TiN 박막의 마찰계수 측정과 드릴링 시험을 행하여 드릴의 내마모성 및 수명을 비교 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Pin-on-Disk type의 마모시험기로 마찰계수를 측정한 결과 Ti 중간층이 TiN 박막의 밀착특성을 향상시키는 것을 확인하였다.

(2) 코팅하지 않은 드릴에 비해서 TiN을 코팅한 경우는 약 2배의 평균수명이 증가하였으나 Ti/TiN 코팅을 함으로써 약 2.6배 증가하였으며, 이것은 TiN만을 코팅했을때보다 30%의 수명향상 효과를 나타내고 있다.

(3) 높은 경도, 화학적 안정성 및 낮은 마찰계수를 갖고있는 TiN은 드릴의 chisel edge마모, flank마모, margin마모 등을 억제하며, 특히 Ti/TiN코팅의 경우는 Ti중간층에 의한 밀착력 향상 효과로 인하여 내마모성이 더욱 향상되어, 드릴링한 구멍내면의 조도가 감소하는 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Hibbs, M.K., Johansson, B.O. and Sundgren, J. E., 1984, "Effects of substrate temperature and substrate material on the structure of reactively sputtered TiN films," *Thin Solid Films*, 122, pp. 115~129.
- (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) 고광만, 김문일, 1991, *열처리 공학회지* 제4권 제4호, pp. 1~14.
- (4) Greene, J.E. and Pestes, M., 1976, *Thin Solid Films*, 37, p. 373.
- (5) Coad, J.P., Dugdale, R.A. and Martindale, L.P., 1981, *Vacuum* 31, p. 365.
- (6) Greene, J.E. and Zilko, J.L., 1978, *Surf. Sci.*, 72, p. 109.
- (7) Coburn, J.W., 1979, *Thin Solid Films*, 64, p. 371.
- (8) Yang, A. and Gao, X., 1988, "Structure and properties of PVD TiN coating on nitrided coating on nitrided steel substrates," *Heat treatment and surface eng. : New technology and practical applications*, pp. 43~48.
- (9) 김홍우, 김문일, 1992, *열처리공학회지*, 제5권 제1호, pp. 1~12.
- (10) Young, C.T. and Becker, P.C., 1983, *Wear of Materials*, pp. 235~242.
- (11) Suh, N.P., 1980, "New theories of wear and their implications for tool materials," *Wear*, 62, pp. 1~20.
- (12) Kalish, H.S., 1977, "Coatings for carbide: TiC or TiN?," *American Machinist*, pp. 90~92, August.
- (13) Hale, T.E., 1981, "Ceramic-coated cutting tools," *Society of Automotive Engineers*, paper No. 810320.
- (14) Guhring Co., 1982, "Modern twist drill technology," Vol.2, p. 5.