

## 초경소재 선정을 위한 고속가공의 엔드밀 성능 평가

권동희 · 김정석 · 김민욱<sup>a</sup> · 정영근<sup>a</sup> · 강명창<sup>a,\*</sup>

부산대학교 기계공학부, <sup>a</sup>부산대학교 하이브리드소재 솔루션 국가핵심연구센터

### Performance Evaluation on the Endmill of High Speed Machining for Selection of Tungsten Carbide (WC-Co) Material

Dong-Hee Kwon, Jeong-Suk Kim, Min-Wook Kim<sup>a</sup>,  
Young-Keun Jeong<sup>a</sup> and Myung-Chang Kang<sup>a,\*</sup>

School of Mechanical Engineering, Pusan National University,  
San 30, Jangjeon-Dong, Geumjeong-Gu, Busan 609-735, Korea

<sup>a</sup>National Core Research Center for Hybrid Materials Solution, Pusan National University,  
San 30, Jangjeon-Dong, Geumjeong-Gu, Busan 609-735, Korea

(Received August 19, 2008; Accepted September 23, 2008)

**Abstract** To satisfy the demand of higher cutting performance, mechanical properties with tungsten carbide (WC-Co) tool materials were investigated. Hardness and transverse rupture strength with WC grain size, Co content and density were measured. Compared to H, K, and S manufacture maker as tungsten carbide (WC-Co) tool materials were used for high-speed machining of end-milling operation. The three tungsten carbide (WC-Co) tool materials were evaluated by cutting of STD11 cold-worked die steel (HRC25) under high-speed cutting condition. Also, tool life was obtained from measuring flank wear by CCD wear measuring system. Tool dynamometer was used to measure cutting force. The cutting force and tool wear are discussed along with tool material characteristics. Consequently, the end-mill of K, H manufacture maker showed higher wear-resistance due to its higher hardness, while the S maker endmill tool showed better performance for high metal removal.

**Keywords :** Endmill tool, Tool wear, Tungsten carbide (WC-Co), High speed machining

### 1. 서 론

공작기계의 전반적인 성능향상과 새로운 공구 그리고 신소재의 개발은 끊임없는 상호 보완적인 관계를 가지면서 발전하고 있는 추세이다[1-3]. 현재 공작기계는 강성증가, 열 변형의 억제와 동적 안정성 및 응답성 개선을 통하여 가공 정밀도를 개선시키고 있으며, 주축계, 이송계, 수치제어 등 많은 분야에서 고속화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 실제 기계가공을 행하는 고속가공용 공구의 개발은 아직 연구와 개발이 미진한 상태이며, 연구의 초점 또한 코팅기술 쪽으로 편중되어 있어 공구의 소재와

형상에 관한 연구나, 그에 대한 데이터베이스가 부족한 상태이다. 또한, 고속가공용 공구로 사용되기 위해서는 날수, 경사각, 여유각 등의 형상 문제가 있지만, 우선적인 요소는 소재의 성능이다.

최근에는 이들이 사용되는 환경이 복잡해지면서 공구에 요구되는 조건이 복잡하고 다양화되어서 초경합금(Cemented carbide)의 성능 향상이 절실히 요구되어지고 있다[4-6]. 초경합금은 일반적으로 WC등의 탄화물 입자와 소량의 철족원소(Fe, Co, Ni) 등으로 구성되어 있으며, 분말 야금방법에 의해 제조하게 된다[7-9]. 초경합금의 특성은 화학적 조성, WC입자의 입도 분포 및 합금중의 탄소량, 미세조직, 가공도, 이

\*Corresponding Author : [Tel : +82-51-510-2361; E-mail : kangmc@pusan.ac.kr]

물질과 같은 결함 등에 의하여 영향을 받는다. 이 중 에서 특히 WC입자의 크기와 WC입자 사이의 코발트 층의 두께(Mean free path)는 초경합금의 특성을 결정하는 가장 주요한 변수이다[10-14].

WC입자의 최소화는 소재 자체의 경도와 항절력을 동시에 증가시켜, 고속가공시 발생하는 높은 압력과 열, 마찰 등으로 인한 공구수명 저하를 최소화 할 수 있다. 그리고 코발트(Co)의 다량 첨가는 강성과 인성을 증가시키는 효과로 엔드밀과 같이 예리한 인성을 가지고 내결손성이 필요한 공구에 적합하다. 또한 Co의 양을 적게한 경우가 탄화티탄(TiC)화물인 첨가물 조성을 변화한 경우보다 항절력 값을 유지시키면서 공구의 고경도 특성을 얻을 수 있다.

따라서 본 연구에서는 금형강 STD11(HRC25)의 고속가공에 있어서, 가장 적합한 공구소재를 선정하기 위해 고속가공용 공구의 모재로 사용되고 있는 초경소재를 크게 3종류로 나누어 기계적 성질을 다양하게 분석하고, 그에 따른 실제 엔드밀 공구를 제작하여 공구마멸, 절삭력 등의 성능평가와 소재원가 측면에서 공구소재 선정 기준을 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 초경소재의 분석

초경합금의 제조공정은 일반적인 분말야금법에 의해 시행하였고, 분말혼합은 Ball-mill을 이용하여 습식으로 행하였으며, 매개체로는 순도가 99.9%인 메탄올(Methanol)을 사용하였다. 본 실험에서는 실온의 대기상태에서 교반기에 분말을 넣고 약 1시간 동안 건조를 실시하였다. 성형방법으로는 수동식 유압 압축기로서 기압 성형하였고, 금형은 상하 펀치(Punch)에 의해 성형 압축을 하였다. 성형 압은 모든 시험편에서 740 kg/cm<sup>2</sup>이다. 그리고 소결로는 진공로를 사용하여 실시하였다. 또한 시험편을 평균 10°C/min 속도로 1380°C까지 가열한 후 1380°C에서 약 30분 동안 유지하였다가 냉각하였다.

각 소재별 초경 시험편에 대해 경도, 항절력(Transverse Rupture Strength: TRS), 밀도를 측정하였으며, 마지막으로 미세조직을 관찰하였다.

경도시험은 ASTM B294규격에 따라 예비하중이 10 kg이고, 총 하중이 60 kg인 로크웰(Rockwell) A scale로 측정하였다. 밀도는 공기 중의 무게와 물 속

에서의 무게 차이로부터 시편의 부피를 구하여 공기 중 무게를 시편의 부피로 나누어 구하였다. 이때 무게는 0.001 g까지 측정하였다. 한편 소결된 초경합금의 강도 및 인성을 측정하기 위하여 항절력 측정을 하였다. 항절력 측정용 시편은 소결 후 8 mm(폭), 4 mm(두께), 20 mm(길이) 크기의 직육면체 형태로 가공하여 제작하였으며, 본 실험에서는 JIS 규격을 따라 항절력을 측정하였다. 항절력 TRS(N/mm<sup>2</sup>)는 JIS 규격에서 명시된 식 (1)에 의해 구하였다.

$$s = \frac{3pl}{2bt^2} \tag{1}$$

여기서 b: 시편의 폭(mm), t: 시편의 두께(mm), p: 하중(N), l: 지지봉간의 거리(본 실험 20 mm)

미세조직은 0~1/2 μm의 Diamond 분말과 Spindle Oil을 혼합하여 이를 Texmet에 바른 뒤 폴리싱하였다. 부식은 K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>, KOH나 NaOH 10 g을 증류수 100 cc에 용해한 일명 MURAKAMI 수용액으로 3~4분간 시켰다. 이와 같이 부식시킨 시편을 “Karl Zeiss” 광학현미경으로 미세구조를 100배로 확대하여 관찰하였다.

### 2.2. 엔드밀 공구의 성능평가

공구 소재에 따른 가공특성을 평가하기 위한 실험

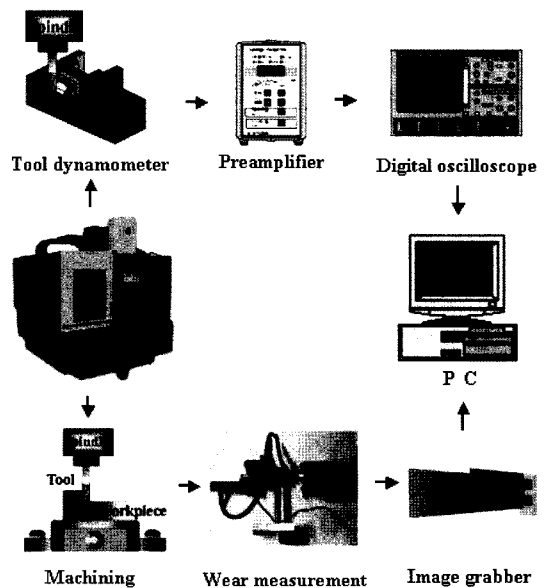


Fig. 1. Experimental setup for tool performance evaluation.

장치도를 그림 1에 나타내었다. 고속가공기 테이블위에 공구마멸시편과 공구동력계 그리고 마멸측정시스템을 부착하여 공구의 성능을 평가하였다.

고속가공에서 소재에 따른 공구의 성능을 평가하기 위해 같은 형상(비틀림각 45°, 경사각 -5°, 여유각 8°)의 엔드밀을 제작하였다.

절삭실험은 고속 머시닝센터(MAKINO V-55, Max 20,000 rpm)로 건식에서 10,000 rpm으로 실험하였고, 절입과 이송은 일정하게 유지하였다. 공구마멸은 여유면에서 0.3 mm를 기준으로 하여 축방향 절입깊이 내의 절삭날부 3지점을 측정하여 평균하였고, 가공조건은 표 1에 나타냈다.

공구마멸과 절삭력의 시편은 고경도재인 금형강 STD11(HRC25)을 사용하였다. 한편 마멸에 따른 공구의 상태 감시를 위해서 주축에서 공구홀더(Tool holder)를 분리할 때 발생할 수 있는 위치정밀도 등의 오차를 방지하기 위하여 CCD카메라를 테이블 위에 설치하였다. 그리고 주축의 고속회전시 고주파가 발생하게 되는데, 기존의 공구동력계(Kistler: 9257B)는 고유 진동수가 낮아 고주파의 절삭신호를 획득하기 어렵다. 따라서 고주파수 영역에서 안정된 응답특성을 갖도록 개발된 고속가공용 공구동력계(Kistler: 9251A)로 절삭력을 획득하였다. 그 외 절삭력과 공구마멸의 측정시스템에 사용된 장치들의 주요규격 및 사양은 표 2에 나타내었다.

**Table 1. Machining conditions for tool performance evaluation**

Tool	Ø10 Flat Endmill (6-flutes)
Workpiece	STD11(HRC25)
Cutting speed (rpm)	10,000
Feed (mm/min)	2,400
Feed per tooth (mm)	0.04
Radial depth (mm)	0.06
Axial depth (mm)	10
Tool overhang (mm)	30

**Table 2. The main specification of experimental instruments**

Instrument	Specification
Dynamometer	3 Axis, Freq. range: 5~10 kHz
Oscilloscope	4Ch, Max Sampling: 400 kHz
CCD Camera	PULNIX(x200)

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 초미립 초경소재의 특성과 공구특성

고속가공용 엔드밀 공구가 소재에 따라 다양한 특성을 가지는 이유는 공구 제조사별로 공구의 형태나 가공조건에 따라 조금씩 다른 조성을 나타내기 때문이다. 여기서 관심을 끄는 부분은 입자 크기가 작아 질수록 경도값이 상승한다는 것이다.

Hall-petch 방정식( $H_v=550+(23500/(d_{wc})^{1/2})$ )에 따르면 경도는 동일한 Co 조성에서 주로 WC 입도에 직접적인 영향을 받으며, WC 입자가 크기가 미세할수록 증가한다. 그리고 동일한 입자 크기에서는 Co 함량이 적을수록 경도는 증가한다. 결과적으로 고경도 특성을 WC 입자 크기의 미세화와 낮은 Co 함량으로 도달할 수 있음을 의미한다[15, 16].

항절력은 소결시 결합제로 작용하는 WC 입자 사이의 Co층의 두께와 연성효과에 의해서 Co 함량이 증가할수록 항절력도 증가한다. 따라서 초경합금 소재의 대표적인 특성치인 경도와 항절력은 서로 상반되는 관계를 가지고 있으며, 공구소재 제작시 용도 및 목적에 따라서 고경도와 내마멸 특성이 요구되는 소재는 상대적으로 작은 Co 조성으로 제조하여야 하며, 인성이 요구되어지는 소재는 상대적으로 높은 Co 조성으로 합금 설계가 이루어져야 할 것이다.

표 3은 초미립 초경소재를 적용한 고속가공용 엔드밀 공구의 성능 평가를 위한 소재분석으로 밀도, 경도, 항절력에 대한 물성치를 얻었으며, 초경합금의 주성분인 WC 입자를 0.5 µm 크기로 균일하게 하고, 경도향상과 높은 인성을 부여하여 직접 제작하였다. 내열성을 증가하기 위한 방법으로는 혼합과 소결공정의 변화를 주었다. 그 결과, S소재에 비해 K소재가 WC 입자의 성장이 일어나지 않으므로, 입자분포가 매우 균일하게 나타난 것으로 사료된다. Co의 첨

**Table 3. Mechanical properties with tungsten carbide (WC-Co) tool materials**

Maker	S	K	H
Co content (%)	10	9	12
WC grain size (µm)	0.6	0.5	0.5
Density (g/cm <sup>3</sup> )	14.45	14.30	14.50
Hardness (HRA)	92.8	93.0	91.8
TRS (N/mm <sup>2</sup> )	4508	3920	3822

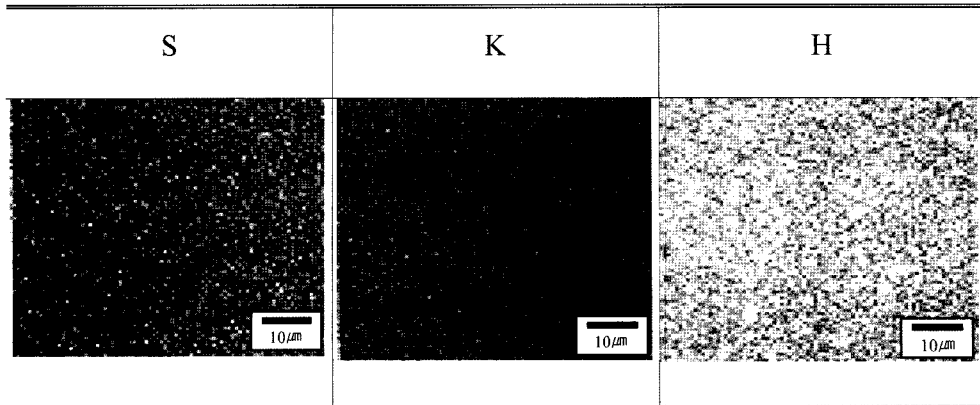


Fig. 2. Micrograph structure of tungsten carbide (WC-Co) materials.

Maker \ Cutting Length	0m (Flank wear:0mm)	13m (Flank wear:0.11mm)	22m (Flank wear:0.31mm)
	H		
S	0m (Flank wear:0mm)	18m (Flank wear:0.13mm)	33m (Flank wear:0.31mm)
K	0m (Flank wear:0mm)	18m (Flank wear:0.14mm)	30m (Flank wear:0.31mm)

Fig. 3. Flank wear pattern according to cutting length taken by CCD camera (Pulnix, X200) in change of tungsten carbide (WC-Co) materials.

가량이 일정한 경우 입자의 성장을 억제시키는 TaC를 첨가함에 따라 액상을 통한 물질 이동이 방해되는 결정입자가 미세해지고, Co: 12%, VC: 0.2%, Cr: 0.5%의 물성치 일 때 경도와 항절력 면에서 가장 우수한 것으로 나타났다. 따라서 우수한 물성을 가지는 초경합금을 위해서는 공정의 다각적 개선과 제조설비의 자동화 등에 의한 안정화 기술이 뒷받침되어야 될 것으로 사료된다. 그림 2는 각 제조사에 따른 초경소재의 미세구조를 나타내고 있다.

3.2. 공구소재에 따른 가공특성

그림 3은 CCD와 전용지그를 이용한 공구마멸 측정시스템에 의해 획득 되어진, 절삭거리에 따른 공구인선부의 마멸형상이고, 이 그림에서는 각 소재별 공구수명을 ISO 3002/1 규정에 준하여, 여유면 마멸(Flank wear) 0.3 mm을 공구수명 기준으로 평가하였다. 또한 각 공구 소재별 중간부분의 이미지는 임의의 절삭거리에서 획득한 인선부의 마멸형상을 나타내었다. 각 초경소재에 따라서 절삭거리에 따른 칩핑과 공구마멸 형태를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 각 초경소재에 따라서 가공거리에 따른 공구마멸의 변화거동을 나타내고 있다. 공구마멸은 전체적으로 안정적으로 진행 됨을 알 수 있다. 단, H소재는 절삭거리 15 m이후에서 공구마멸이 급격히 진행되었는데, 이는 공구인선부의 과다 칩핑(Chipping)에 의한 것으로 사료된다. 이러한 결과는 초경소재의 기계적 특성에서 볼 때 경도와 항절력의

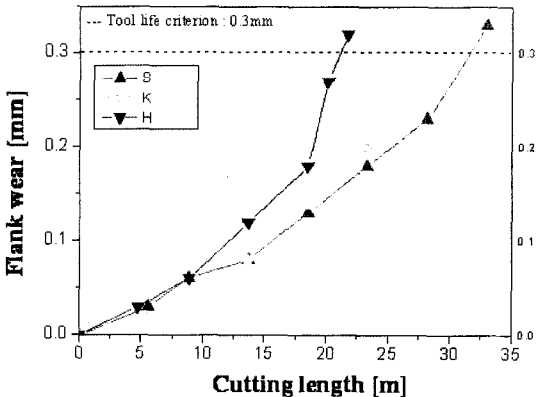


Fig. 4. The comparison of flank wear as a function of cutting length for three kinds of tungsten carbide (WC-Co) materials.

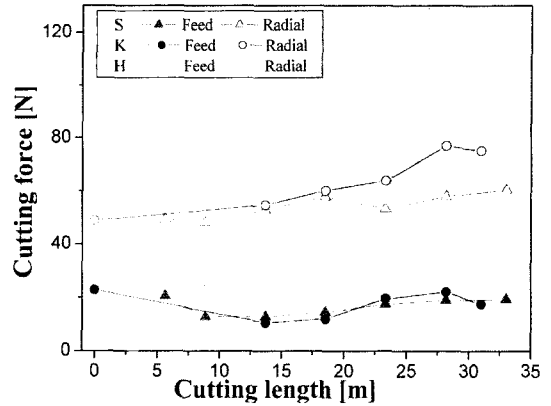


Fig. 5. The comparison of cutting force as a function of cutting length for three kinds of tungsten carbide (WC-Co) materials.

부족으로 내마멸성과 인성이 저하된다고 생각되며, 이는 기존의 보고결과와 매우 잘 일치한다[17]. 공구수명(여유면 마멸(Flank wear) 0.3 mm)은 S > K > H 순으로 나타났고, S소재가 H소재에 비해 30%정도 긴 공구수명을 보였다. 이러한 특성으로부터 초경소재의 기계적 특성이 엔드밀공구의 절삭성능을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 공구동력계로 측정된 절삭력을 나타내었다. 반경방향 절삭력이 이송방향보다 2배 이상 크게 나타났다. 이는 고속가공이긴 하지만, 상대적으로 회전속도 즉, 주 절삭속도가 이송속도보다 느리기 때문인 것으로 사료된다. 또한 바닥면과의 마찰 등에 의해 절삭저항이 증가에 따른 영향으로 반경방향 절삭력이 크게 나타나고 있다. 초기 절삭력은 소재와 관계없이 동일한 공구형상으로 반경방향, 이송방향 절삭력이 유사한 형태로 나타나지만, 절삭거리가 증가하면서 바닥면과의 마찰로 인해 절삭부하가 크므로, 이송방향 절삭력에 비해 반경방향의 절삭력이 크게 증가한 것으로 사료된다. 특히, H소재의 경우 15 m 지점 이후 반경방향 절삭력이 크게 증가 하였는데, 이는 마멸거동과 같이 과다 칩핑에 의한 것으로 절삭력에서도 같은 결과로 나타났다. 그림 3의 마멸형상에서도 H의 소재가 절삭거리 15 m에서 인선부에 칩핑이 발생된 것이 확인 되었다. 그리고 칩핑이 발생된 이후 반경방향의 절삭력이 급격하게 증가하였고, 공구마멸이 다른 소재보다 빠르게 진행되었다.

고속가공에 적합한 적정 초경소재를 선정하기 위

**Table 4. Result of performance evaluation with tungsten carbide (WC-Co) tool materials**

Classification	Evaluation item			
	Mechanical properties	Tool life	Cutting force	Material cost
H	○	X	X	△
K	○	○	○	△
S	○	○	○	X

○ : Good, △ : Normal, X : Bad

해 공구성능을 비교 평가하여 표 4와 같은 결과를 얻었다. 기계적 특성으로는 H, K, S소재 모두 우수하나, 공구수명 등의 공구성능 평가에서는 H소재, 소재원가 측면에서는 S소재가 가장 안 좋은 것으로 나타났다. 공구수명은 S의 소재가 가장 긴 공구수명(33 m)을 나타냈고, H의 소재가 가장 짧은 공구수명(22 m)을 나타냈다. H의 경우 칩핑이 발생하고, 공구마멸이 급격히 진행되어 우수한 성능을 얻을 수 없었다. 반면 S와 K 재종은 상대적으로 절삭력 크기가 작아서 H보다 안정적으로 마멸이 진행되었다. 이를 토대로 기계적 성질(경도, 항절력 등), 공구수명, 절삭력, 소재원가를 모두 고려했을 때 고속가공용 엔드밀의 재종으로는 K소재가 가장 적당함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고속가공을 위한 엔드밀 공구의 초경소재를 선정하기 위하여, 공구 성능 평가를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

각 소재별 고속가공용 초경소재의 기계적 성질을 분석한 결과, ISO에서 제시하고 있는 규격을 대체로 만족함을 알 수 있으나, S소재는 항절력이 대단히 우수함을 보였다. 재종별 소재의 공구수명은 S > K > H 순으로 우수하게 나타났고, S의 소재가 H에 비해 약 30%정도 우수한 공구수명을 보였다. 그러나 소재원가 측면에서는 S소재가 가장 비용이 높은 것으로 나타났다. 절삭력은 반경방향 절삭력이 이송방향보다 2배 이상 크게 나타났으며, S와 K의 소재가 상대적으로 절삭력의 크기가 작아서 H재종 보다 안정적으로 공구마멸이 진행됨을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터, 고속가공용 초경소재에 있어서

기계적 특성, 공구마멸에 의한 공구수명, 절삭력 및 소재원가 측면에서 비교한 결과, K사의 초경소재(WC grain size( $\mu\text{m}$ ):0.5, Co content(%):9, Hardness (HRA):93.0, TRS(N/mm<sup>2</sup>):3920)가 가장 적합함을 알 수 있었다. 향후 고속가공용 엔드밀 공구의 소재 선정에 있어서 유용한 정보로 활용될 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] S. Hogmark, S. Jacobson and M. Larsson: *Wear*, **246** (2000) 20.
- [2] W. Y. Bao and I. N. Tansel: *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **40** (2000) 2155.
- [3] S. Ulvi and H. Hasan: *J. of Mat. Proce. Technol.*, **173** (2006) 260.
- [4] S. Tomasz, G. Witold and J. Jacek: *Surf. Coat, Technol.*, **194** (2005) 319.
- [5] M. Rahman and A. S. Kumar: *J. Of MTM*, **42** (2001) 539.
- [6] W. Maritzen: *Powder Metall.*, **17** (1985) 68.
- [7] W. M. Daoush, K. H. Lee, H. S. Park, J. J. Jang and S. H. Hong: *J. Korean Powder Metall. Inst.*, **3** (2007) 208-214 (*Korean*).
- [8] J. Almer, M. Oden and G. Hakansson: *Thin Solid Films*, **385** (2001) 190-197.
- [9] T. Cselle and A. Barimani: *Surf. Coat. Technol.*, **76-77** (1995) 712.
- [10] E. Lardner: *Power Metall.*, **21** (1978) 65.
- [11] H. Juan, S.F. YU and B.Y. Lee: *Int. J. of Mach. Tools Manuf.*, **43** (2003) 679.
- [12] D. R. Kumar: *Indian Inst. of Technol.*, **45** (2002) 219.
- [13] S. W. Huang, M. W. Samandi and M. Brandt: *Wear*, **252** (2002) 566.
- [14] J. C. Kim, G. H. Ha and B. K. Kim: *J. Korean Powder Metall. Inst.*, **2** (2004) 124-129 (*Korean*).
- [15] J. H. Kim, D. K. Moon, D. W. Lee, J. S. Kim, M. C. Kang and K. H. Kim: *J. of Mat. Proce. Technol.*, **130-131** (2002) 126.
- [16] H. Saito, A. Iwabuchi and T. Shimizu: *Wear*, **261** (2006) 132.
- [17] D. H. Kwon, M. C. Kang, J. S. Kim, J. T. Ok and K. H. Kim: *Surf. Coat. Technol.*, **200** (2005)1933.