研究論文

工業用純チタンの被切削性に及ぼす K 種超硬工具の影響

能登谷久公*・山田 茂*・吉川 和男*
高辻 雄三*・沖野 捷男**

Effects of tungsten carbide tool on machinability of commercial pure titanium

Hisakimi NOTOYA*, Shigeru YAMADA*, Kazuo YOSHIKAWA*
Yuzo TAKATSUJI* and Yukio OKINO**

Sintered WC tools are known to be effective and economical cutting tool for titanium alloy. Carbide tools with various grain size, content of WC and side rake angle were tested to evaluate the cutting performance—tool wear, cutting force and finished surface—in machining of commercial pure titanium. The wear resistance of the tools changes with the grain size of WC, in such a way that the tool with 1 μm WC grain is the best. The wear of the tool with 94 wt% WC is the smallest among the composition range of WC between 93 and 97 wt% under the grain diameter of WC fixed to about 1 μm . The tool wear progresses slowly and the level of cutting force is low for the tools with pressed chip breaker, regardless of WC content. An excellent cutting performance is found to be obtainable with the tool which has a side rake angle between $-\pi/39$ and $\pi/36$ rad.

Keywords: commercial pure titanium, machining, flank wear, rake wear, depth of crater

(Received March 15, 1990)

1. 緒 言

航空宇宙用もしくは海洋開発用資材としてチタンおよびチタン合金は大量に使用されるようになってきた¹⁾。しかし、これらの材料は加工硬化性に富むため塑性加工が困難であり、切削加工を施して供用されることが多い。チタン材は熱物性値が低く、かつ化学的活性が高いことから切削の際に工具に付着して工具摩耗を大きくすることが知られている。そのためチタンおよびチタン合金は難削材とされ、その切削性の改善については、これまでもいくらかの報告がみられる^{2)~8)}。

著者等もさきに工業用純チタンについて数種の CBN 工具およびダイヤモンドコンパックス工具等による切削を行い、工具摩耗の観察およびすくい面付着物の分析同定から工具の摩耗機構について若干の考察を行った。その結果、CBN 工具および SiN 工具では比較的低い切削速度であっても切削時間が長くなるとチッピングを生じ、切削の継続は困難であった⁹⁾。また指摘されているように、チタンの切削には超硬工具が比較的良好な切削

性を示すことが知られた。

本研究は、この工業用純チタン切削の際に比較的低い工具摩耗を示した K 種超硬工具について、タングステンカーバイト量の異なる工具、タングステンカーバイト粒径の異なる各種の工具におよび超硬 K10 で横すくい角の異なる各種の工具による切削を行い、純チタンの被切削性に及ぼす工具組成および工具形状の影響等についての検討を行った。

2. 実験方法

切削工具としてはタングステンカーバイトとコバルト混合比の異なるもの、タングステンカーバイト粒径の異なるもの（結果としてコバルト量も異なるが）、および K10 工具で横すくい角の異なる数種の工具による工業用純チタンの乾式切削を行った。また、混合比の異なるものの一部に、刃先に平行にチップブレーカとしての溝を付けたもの（図中、溝付き工具を G. Tool、溝の無いものを F. Tool とする）も用意し、これについても同様の

* 富山大学工学部（富山市）。Faculty of Engineering, Toyama University (Toyama-shi, Toyama).

** 東京タングステン(株)（富山市）。Tokyo Tungsten Co., Ltd., Toyama Plant (Toyama-shi, Toyama).

Table 1 Sintered WC tools used

Flat tool	Dia. of WC	WC content	Groove tool
No. 1	1.0 μm	93 wt%	—
No. 2	1.0	94	No. 2G
No. 3	1.0	95	No. 3G
No. 4	1.0	96	No. 4G
No. 5	0.8	88	—
No. 6	2.0	97	—
No. 7	4.0	98	—

Tool dimension; $-\pi/36, -\pi/36, \pi/36, \pi/36, 3\pi/36, 3\pi/36, 0.4$

K10, Tool dimension; $0, \theta, \pi/30, \pi/30, \pi/30, 0, 0$.
 $\theta = -\pi/36 (-5^\circ), \pi/36 (5^\circ), 3\pi/36 (15^\circ), 5\pi/36 (25^\circ)$

切削を行った。工具組成および工具形状は Table 1 に示すようである。

なお、チップブレイカの形状は、横切刃に平行に刃先から 0.15 mm の平坦部を残して、深さ 0.3 mm、幅約 1.6 mm の溝が付けてある。

被削材はさきに報告したものと同様、直径約 100 mm の工業用純チタンの押出し材で、この場合も市販材のまま外径を揃えて切削に供した。被削材の化学組成および切削条件は Table 2 および Table 3 に示すごとくである。

工具摩耗の測定については、逃げ面摩耗が比較的少ないため、主としてすくい面摩耗痕とすくい面のクレータ深さの測定を行った。すくい面摩耗および逃げ面摩耗は工具顕微鏡で測定し、クレータ深さはあらさ計タリサーフ 4 型によるすくい面の断面曲線より求めた。

切削抵抗は切削主方向成分（以後、主分力： F_c ）および工具送り方向成分（以後、送り分力： F_f ）の二方向成分を測定するもので、切削開始直後と所定時間切削後の切削抵抗の比較を行った。

仕上げ面あらさはタリサーフ 4 型を用い、切削開始直後のものと所定時間切削後のものを対比させた。

3. 結果と検討

タングステンカーバイト（以後 WC で示す）とコバルト（以後 C₆ で示す）の混合比の異なる場合の工具先端部分のすくい面摩耗は Fig. 1 に示すごとくで、94% WC の工具摩耗は切削時間 10 s で 0.3 mm 程度に達し、以後 100 s 程度まで漸増している。それ以外の工具では切削時間 10 s ですくい面の摩耗は 0.35 mm ~ 0.40 mm に達しているが、その後の摩耗の増加はごくわずかである。切削時間 180 s 前後ではこれらの摩耗に大きい差はみられないが、全般に 95%、96% WC のものはすくい面

Table 2 Chemical composition of specimen (mass%)

Material	Fe	C	N	H	O	Al	V	Sn	Ti
Titanium	0.31	0.019	0.01	0.01	0.31	<0.1	<0.1	<0.1	bal

Table 3 Cutting conditions

Cutting speed	: V=3.0 m/s
Feed rate	: f=0.10 mm/rev.
Depth of cut	: t=1.0 mm
Cutting fluid	: Dry condition

Fig. 1 Effects of WC content on relation between width of rake face wear and cutting time.

摩耗が大きくなる傾向がみられる。また、ここでは示さなかったが、切削時間 500 s では 95%、96% WC 工具のすくい面摩耗は大きくなることが観察された。切削時間 500 s 後の各工具の先端摩耗およびすくい面のクレータ深さは Fig. 2 にみられるごとくで、94% WC のものは両方の摩耗とも少なく、これより WC 量の多いものも少ないものもクレータ深さおよび先端摩耗は大となっている。これは WC 粒子を焼結するための最適の C₆ 量が存在することが考えられる。

また、WC 量の異なるものについて、チップブレイカ溝（以後、ブレイカ溝という）を付けた工具（G. Tool）と付けない工具（F. Tool）のすくい面摩耗を対比させたものは Fig. 3 に示すごとくである。この場合、Fig. 4 にみられるように、ブレイカ溝のあるものと無いものとは先端部の摩耗状態が異なるため、切込み深さの二分の一の部分（先端より約 0.5 mm の位置）の摩耗幅を測定し、これをすくい面平均摩耗とした。Fig. 3 によれば溝付き工具のほうがすくい面平均摩耗が全体的に小となっている。これは切れ刃先端の約 0.15 mm のプラート部が切り屑の接触面積拘束工具の機能を果たし、切り屑と工具すくい面との接触面積が小となるため、切り屑流出に伴う摩擦抵抗が減少する^{10), 11)}。そのため、すくい

Fig. 2 Effects of WC content on depth of crater and width of rake face wear after cutting 500 s.

面での摩擦による発熱量が減少すること、すくい面摩擦の変化がブレーカ溝の断面形状に支配されることと併せて、切削時間180 s程度までは明らかにブレーカ付き工具の摩耗は少ない。また、Fig. 3において、各工具の摩耗状態をみると、ブレーカ溝のある場合と無い場合とでは、この摩耗の順位がまったく逆になっている。しかし、切削時間180 sで、すくい面摩擦がある程度進行し

Fig. 3 Effects of WC content and pressed chip-breaker on relation between mean width of rake face wear and cutting time.

た状態になると、ブレーカ溝の有無にかかわらず、WC成分が多く、したがってC₀成分の少ない工具の摩耗は大となっている。また、Fig. 5はWC量の異なる場合の切削抵抗を示したものであるが、初期における切削抵抗は、ブレーカ溝付き工具ではブレーカ溝の無いものに比して主分力F_cで約15%、送り分力F_fで約50%低下している。工具すくい面の摩耗は主として流出する切り屑の擦過によるものであるが、ブレーカ溝付き工具では送り分力F_fが約二分の一に低下している。したがって、刃先平坦部に作用する主たる切削抵抗が、主分力F_cに基づく、すくい面への垂直力であることを考慮すれば、相対的硬度の高いWC組成の多いものの方が耐摩耗性

Fig. 4 Wear patterns of tools with and without pressed chip breaker as influenced by amounts of WC after cutting 180 s.

Fig. 5 Effects of WC content and pressed chip breaker on cutting force.

に優れることが考えられる。

一方、ブレカ溝の無い工具では切屑接触面積が広くなり、切削温度および送り分力も大となるため、 C_0 量が多く、WC粒子の保持特性の高い工具の方が摩耗が少なくなると考えられる。このような、工具の硬度および C_0 の粒子結合強度を考慮すると、ブレカ溝の有無に関わらずWC 94%, C_0 6%工具が耐摩耗性にすぐれ、長時間の使用に耐えることが考えられる。

つぎにWC粒径の異なる場合のすくい面摩耗はFig. 6のごとくで、切削時間20 sでいずれの粒度の工具においてもかなり大となるが、その後の摩耗の増加はわずかである。工具摩耗に及ぼすWC粒径の影響をみると、粒径 $1\mu\text{m}$ のものが最も摩耗が小さく、粒径 $0.8\mu\text{m}$ とより小さいもの、あるいは粒径 $2\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$ と大きいものの方がすくい面摩耗が大となっている。

これはWC粒径が小さい場合、比表面積が大きくなるため、粒子の焼結機構上 C_0 量が多くなり、粒子保持力は大きくなることが考えられるが、Table 1に示すごとく C_0 量が多すぎる場合には工具としては軟質となり、工具摩耗は増大することが考えられる。一方WC粒径が大なる場合、その比表面積は小となって相対的に C_0 量は減少し、その結合強度を低下せしめる。そのためWC粒径の大きい工具においてもその摩耗は大となることが考えられる。

WC粒径が異なる場合の180 s切削後のすくい面と逃げ面摩耗の状態はFig. 7に示すようで、すくい面摩耗に多少の差はあるが、工具の全般的な摩耗状況に大きい差はみられない。Fig. 8はWC粒径の異なる工具の

Fig. 6 Effects of grain size of WC on relation between width of rake face wear and cutting time.

Material Ti		Tc=180 (s)		v=3.0 (m/s)		f=0.1 (mm/rev)		t=1.0 (mm)	
		No. 6		No. 7		No. 1		No. 5	
Rake face									
Flank face									

Fig. 7 Wear patterns of tools for various grain sizes of WC after cutting 180 s.

切削初期と180 s切削後の切削抵抗を示すものである。

切削初期ではいずれの工具においても切削抵抗はほぼ等しいが、180 s切削後ではいずれの場合も切削抵抗は小となっており、主分力より送り分力のほうが減少割合が大となっている。これはすくい面に発生するクレータが有効すくい角¹²⁾を大きくし、切り屑流出を容易ならしめるためと考えられる。また、180 s後の切削抵抗は工具摩耗の少ないものの方が小となるが、これはクレータ深さがある程度以上となると、切り屑とクレータとの接触面積が増加し、摩擦抵抗が大となるためと考えられる。以上の事柄を考慮すると、 C_0 量の差異は別として、WC粒径としては $1\mu\text{m}$ 程度の工具が耐摩耗性にすぐれることが知られる。

つぎに、超硬工具K10について、横すくい角 θ の異なる工具の逃げ面摩耗およびクレータ深さはFig. 9に

Fig. 8 Effects of grain size of WC on cutting force.

Fig. 9 Effects of side rake angle on relation between depth and width of rake face wear and cutting time.

示すようで、横すくい角 θ が $-\pi/36$ (-5°) の工具の逃げ面摩耗はほかのものより二分の一から三分の一程度と少ないが、その他のものでは逃げ面摩耗に及ぼす横すくい角の影響は明らかではない。また、この場合のクレータ深さは切削の進行によって錯綜しながら増加する傾向を示しており、クレータ深さの増加に及ぼす横すくい角 θ の差は明らかではない。

横すくい角の異なる K10 工具の 180 s 切削後のすくい面および逃げ面の摩耗状態は Fig. 10 に示すごとくで、

Fig. 10 Wear patterns of tools for various side rake angles after cutting 180 s.

横すくい角 $-\pi/36$ および $\pi/36$ のものは比較的明瞭なクレータ痕がみられる。一方、横すくい角が $3\pi/36$ および $5\pi/36$ と大きい工具では、すくい面はあれた状態となっており、あらさ計による断面形状の測定は可能であったが、写真では、はっきりしたクレータ痕は認められない。

また、この場合の切削初期と 180 s 後の切削抵抗は Fig. 11 に示すごとくで、切削初期では横すくい角の増加に伴って主分力、送り分力とも小となっている。

切削時間 180 s 後に明瞭なクレータのみられる横すくい角 $-\pi/36$ および $\pi/36$ の工具の切削抵抗は 10%～15% 増加している。しかし、すくい面に明瞭なクレータのみられない、大きい横すくい角のものでは 180 s 後の切削抵抗は大きく増大しており、ことに送り分力の増加は顕著である。したがって本実験の範囲では横すくい角 $-\pi/36$ および $\pi/36$ の工具で良好な切削性を示すことが知られた。

各種工具による切削仕上げ面のあらさをみると、WC 量の異なる場合の、切削初期および 180 s 後のあらさは Fig. 12 に示すようで、切削初期ではブレイカ溝付き工具のほうが小さいが、180 s 後のあらさはクレータ深さおよびすくい面摩耗の小さい工具のほうが大となっている。またここでは示さなかったが、WC 粒径および横すくい角の異なる工具では、切削前後におけるあらさの変化はわずかであり、この場合も工具摩耗の少ないもののほうがあらさはやや大きいことが知られた。

Fig. 11 Effects of side rake angle on cutting force.

Fig. 12 Effects of WC content on finished surface roughness.

4. 結 言

K 種系超硬工具について、WC 組成および WC 粒径の異なる工具、K10 では横すくい角の異なる工具を用いて工業用純チタンの切削を行い、その切削性に及ぼす工具条件の影響について検討を行った。その結果について以下に述べる。

(1) 工具組成についてみると、WC 粒径 $1\mu\text{m}$ のもので 94% WC, 6% C₀ の工具がいずれの摩耗も少なく、良好な切削性を示した。

(2) WC 粒の大きさの異なる場合、焼結機構上 C₀ 量が一定ではないため、一様に論ずることは適当ではないが、粒径 $1\mu\text{m}$ 程度のもののほうが工具摩耗が小さかった。

(3) 横すくい角の異なる K10 工具では、横すくい角が $-\pi/36$, $\pi/36$ の場合の工具摩耗が少ないことが知られた。

参 考 文 献

- 1) 加集誠一郎：金属，臨時増刊号；**82** (1982)，81.
- 2) N. Narutaki and Y. Yamada: Annals of the CIRP, **28** (1979)，23.
- 3) 鳴瀧則彦：機械技術，**30** (1982)，44.
- 4) 竹山秀彦，飯島 昇，藤川健太郎：S57 精機学会秋期大会講演論文集 (1982)，4.
- 5) 奥田孝一，岩田一明，土肥嘉夫，広瀬啓二：S57 精機学会秋期大会講演論文集 (1982)，52.
- 6) 高橋孝誠，古江俊夫：熊本工業技術センター研究報告，**25** (1987)，19.
- 7) 本西 英，磯田繁雄：機械技術，**34** (1986)，10.
- 8) 梅沢三造，木曾弘隆：機械技術，**35** (1987)，80.
- 9) 能登谷久公，山田 茂，吉川和男，高辻雄三：日本金属学会誌，**54** (1990)，102.
- 10) B. T. Chao and K. J. Trigger: Trans. ASME, **81** (1959)，139.
- 11) E. Usui and M. C. Shaw: Trans. ASME, **84** (1955)，89.
- 12) 臼井英治：切削研削加工学(上)，共立出版(1971).