

# PVD コーティング工具による難削材の高能率・高精度加工に関する研究(第2報) —UBMS 法による TiCN コーティングエンドミルの切削温度—

金沢大学 ○嶋村公二, 細川 晃, 上田隆司, (株)北熱 政 誠一

Studies on High-efficiency and High-precision Machining of Difficult-to-cut Materials by PVD Coated Tools (2st Report)  
- Cutting Temperature of TiCN-Coated End Mills Deposited by UBMS Method -

Kanazawa University Koji SHIMAMURA, Akira HOSOKAWA, Takashi UEDA, Hokunetsu Co., Ltd. Seiichi MASA

The UBMS (UnBalanced Magnetron sputtering) method is applied to the coated end mills and some kinds of such tools are used in high-speed milling of SUS304. This coating film is designed to improve lubricating ability rather than heat resistance. Lower cutting temperature is obtained with these UBMS-type TiCN-coated tools than the ordinary AIP-coated tools in high-speed side milling without coolant.

## 1. 緒言

難削材切削用のエンドミルやドリルの PVD コーティングとしては、アーキオンプレーティング法(以下 AIP 法)による TiAlN(窒化チタンアルミ)や AlCrN(窒化アルミクロム)が主流となっている。これらは、主として切削熱から工具母材を保護することを目的とした“耐熱性”重視のコーティングである。これに対し本研究では、優れた平滑性および低い摩擦係数が期待できるアンバランスドマグネトロンスパッタ法(以下 UBMS 法)によるコーティング膜を切削工具に適用することを提案する。切削工具に潤滑性を付与すれば、工具摩擦の進行や被削材の熱変形を抑制できる可能性がある。

既報<sup>1)</sup>では、UBMS 法および AIP 法によって 5 種類のコーティング膜を作製し、膜の機械的性質を評価するとともに、これらのコーティング膜を施したエンドミルによる SUS304 の高速乾式切削を行った。その結果、UBMS 法の TiCN コーティングエンドミルは、切削抵抗や工具逃げ面への被削材の凝着および工具すくい面への切りくずの堆積を減少でき、難削材切削で課題となる工具摩擦や被削材のむしれを大幅に抑制できることを明らかにした。これは UBMS 膜の低い摩擦係数に起因すると考えているが、工具摩擦に影響する切削温度の低下も期待される。そこで本報では UBMS 法による TiCN の切削温度を明らかにするため、非接触で微小領域の温度測定が可能な光ファイバ型 2 色温度計<sup>2)</sup>を用いて高速乾式切削における工具温度を測定した結果について報告する。さらに、コーティング膜の耐熱性の評価も行った。

## 2. UBMS 法による TiCN コーティング

UBMS 法は反応スパッタ法の一つで、陰極である金属ターゲットに効率よく Ar イオンを衝突させ、はじき出された金属を反応ガスと結合させながら基板に生成する方法である。AIP 法によるコーティング膜では表面にドロップレットと呼ばれる突起物が発生するが、UBMS 法では平滑な表面が得られる。著者ら<sup>1)</sup>は UBMS 法によって生成した TiCN に C-C 結合(以下、フリーカーボン)が多く含まれ、低い摩擦係数を示すことを明らかにしている。

## 3. 実験方法

本研究で使用したコーティング膜の製法および構造を表 1 に示す。UBMS 法による TiN(以下、U-TiN)および TiCN(以下、U-TiCN)の作製には量産型バッチ式 UBMS 装置、AIP 法による TiN(以下、A-TiN)、TiCN(以下、A-TiCN)および TiAlN(以下、A-TiAlN)の作製には量産型バッチ式 AIP 装置を用いた。コーティング膜厚は合計 3 $\mu$ m とした。なお、U-TiCN および A-TiCN の構造は、基材との密着性を確保するため TiN 層と TiCN 層の 2 層構造としている。これら 5 種類のコーティング膜を高速工具鋼試験片(12.7mm $\times$ 12.7mm $\times$ 5mm)と微粒子超硬エンドミル( $\phi$ 2mm, 2 枚刃, ねじれ角:30 $^\circ$ )に施した。

切削試験には金型加工用マシニングセンタ(株)森精機製作所製、NVD1500DCG)を使用し、SUS304(Hv200)の乾式側面加工を実施した。温度測定には InSb/MCT 素子を有した光ファイバ型 2 色温度計を用い、被削材を切削した直後の逃げ面温度を測定で

Table 1 Coating samples

Sample	Process	Structure
U-TiN	UBMS	TiN (3.0 $\mu$ m)
U-TiCN	UBMS	TiN (1.5 $\mu$ m) + TiCN (1.5 $\mu$ m)
A-TiN	AIP	TiN (3.0 $\mu$ m)
A-TiCN	AIP	TiN (1.5 $\mu$ m) + TiCN (1.5 $\mu$ m)
A-TiAlN	AIP	TiAlN (3.0 $\mu$ m)

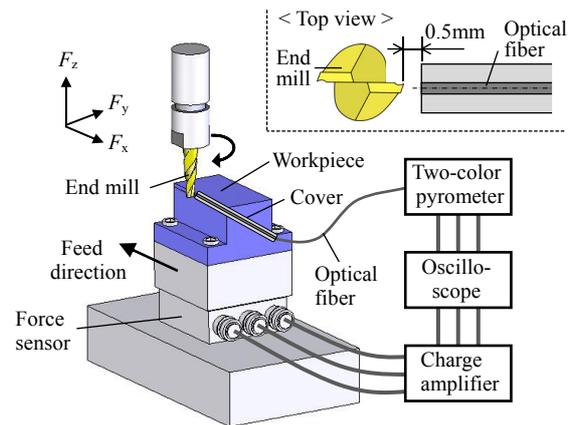


Fig.1 The measuring method of cutting force

Table 2 Cutting condition

Tool	$\phi$ 2mm, 2-flute square end mill
Work piece	SUS304 (Hv200)
Cutting speed	$V$ : 50, 220(m/min)
Spindle rotation	$N$ : 8000, 35000(min $^{-1}$ )
Feed speed	$F$ : 80, 350(mm/min)
Feed per tooth	$f$ : 0.005mm/tooth
Axial depth of cut	$A_d$ : 1mm
Radial depth of cut	$R_d$ : 0.05mm
Cutting length	$L$ : 2600mm (26mm $\times$ 100pass)
Cutting style	Side milling, Up cut, Dry

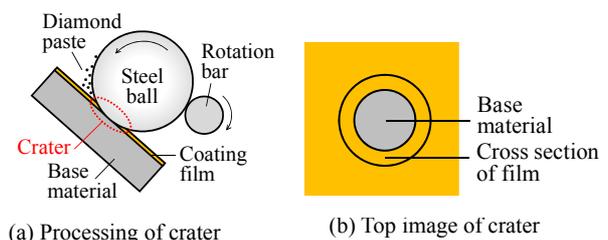


Fig.2 Oxidation test of coating film

きるよう、光ファイバ受光部をエンドミル近傍に設置した(図 1)。また、温度測定時の切削抵抗は被削材下部に設置した圧電力計(Kistler 製, 9251A)により測定した。切削条件を表 2 に示す。1 刃あたりの送り速度  $F$  は  $0.005\text{mm/tooth}$  とし、標準切削速度  $V=50\text{m/min}$  および高切削速度  $220\text{m/min}$  にて行った。

さらにコーティング膜の耐熱性を評価するため、電気炉による酸化試験を実施した。コーティング試験片を  $400^\circ\text{C}$ 、 $500^\circ\text{C}$ 、 $600^\circ\text{C}$ 、 $700^\circ\text{C}$  および  $800^\circ\text{C}$  の 5 水準で 5 時間加熱後、図 2 に示す回転させた鋼球で表面をクレーター状に加工し、露出した膜断面をレーザー顕微鏡で観察した。

#### 4. 実験結果

##### 4.1 工具温度および切削抵抗

光ファイバ型 2 色温度計の温度校正結果を図 3 に示す。実線は素子の感度等から算出した理論曲線で、実験値とよく一致している。校正に用いた TiAlN 試験片の温度上昇と共に InSb/MCT 素子の出力電圧比が変化しており、およそ  $100^\circ\text{C}$  以上の温度を測定できることがわかる。この温度計を用いて各コーティングエンドミルの逃げ面温度を測定した結果を図 4 に示す。なお、標準切削速度  $V=50\text{m/min}$  では素子の出力電圧が非常に小さく測定誤差が大きいため、高切削速度  $V=220\text{m/min}$  のみの値を示す。高い逃げ面温度を示したのは U-TiN、A-TiN および A-TiAlN の 3 種類で、約  $400^\circ\text{C}$  であった。これらと比較すると U-TiCN および A-TiCN の逃げ面温度は低く、特にフリーカーボンを多く含有している U-TiCN は  $310^\circ\text{C}$  を示し、A-TiAlN よりおよそ  $100^\circ\text{C}$  低い値となった。これは耐熱性が問題となる難削材加工に有利と考えられる。

各コーティングエンドミルの切削抵抗  $(F_x^2+F_y^2)^{1/2}$  を測定した結果を図 5 に示す。高切削速度  $V=220\text{m/min}$  では圧電力計の応答速度が追従できないため、標準速度  $V=50\text{m/min}$  のみ評価した。UBMS 法である U-TiN と U-TiCN の切削抵抗は AIP 法の場合より低く、特に U-TiCN は大幅に低い値を示している。

これらの結果より、U-TiCN 膜はその低い摩擦係数によって被削材の凝着や切りくずの堆積を抑制するのみならず、低い切削抵抗と低い工具温度を示すため、小径エンドミルを用いた難削材の切削に有効であるといえる。

##### 4.2 酸化試験

耐酸化温度はコーティング膜の重要な特性であるため、酸化試験を行った。酸化試験後の U-TiN 断面観察像を図 6 に示す。図 6(a)の加熱温度  $400^\circ\text{C}$  では金色の TiN 層が観察されるが、図 6(b)の加熱温度  $600^\circ\text{C}$  では最外層の色調が茶色に変化している。X 線回折では加熱温度  $600^\circ\text{C}$  の U-TiN から TiN と  $\text{TiO}_2$ (酸化チタン)のピークが検出されており、茶色の層は酸化が進行していると考えられる。ここで酸化が進行した加熱温度を酸化温度と定義し、各コーティング膜の酸化温度を比較した結果を図 7 に示す。U-TiN、A-TiN および A-TiCN の酸化温度は  $600^\circ\text{C}$ 、耐熱性に優れているとされる A-TiAlN は  $800^\circ\text{C}$  であったのに対し、U-TiCN は若干低い  $500^\circ\text{C}$  を示した。U-TiCN は A-TiCN よりフリーカーボンを多く含有していることが酸化温度の低下に影響したものと考えられる。しかしながら、図 4 にみるように高切削速度における U-TiCN の工具温度は  $310^\circ\text{C}$  で、酸化温度を約  $200^\circ\text{C}$  下回る温度で切削可能なため、工具の熱損傷に与える影響は小さいものと考えられる。U-TiCN の酸化温度を考慮して切削条件を決定することにより、様々な切削工具への適用が期待できる。

#### 5. まとめ

- (1) 高切削速度  $V=220\text{m/min}$  におけるエンドミルの逃げ面温度を測定した結果、UBMS 法による TiCN コーティングエンドミルは最も低い  $310^\circ\text{C}$  を示した。
- (2) コーティング試験片による酸化試験を実施した結果、UBMS 法による TiCN の酸化温度は  $500^\circ\text{C}$  であった。

最後にマシニングセンタの無償貸与をいただいている MTRRF (Machine Tool Technologies Research Foundation)ならびに(株)森精機製作所に感謝します。また、財団法人北陸産業活性化センター・R&D 推進・研究助成事業からの援助に感謝いたします。

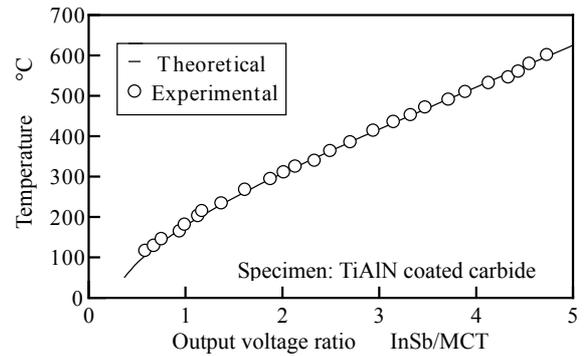


Fig.3 Calibration curves of two-color pyrometer

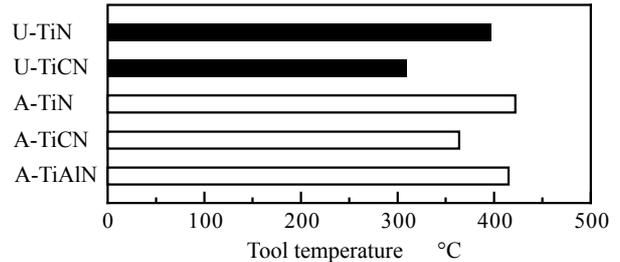


Fig.4 Tool temperature of end mills during cutting test ( $V=220\text{m/min}$ ,  $L=2600\text{mm}$ )

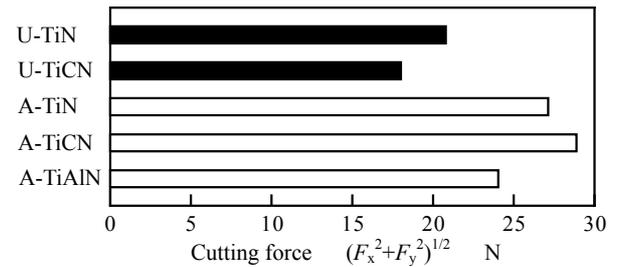


Fig.5 Cutting force during cutting test ( $V=50\text{m/min}$ ,  $L=2600\text{mm}$ )

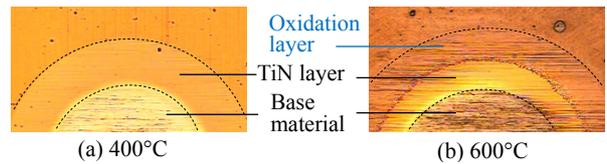


Fig.6 Cross section of U-TiN after oxidation test

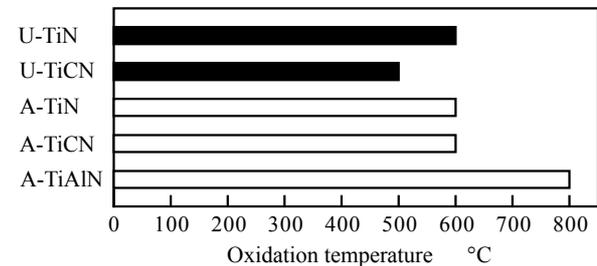


Fig.7 Oxidation temperature of coating films

#### 参考文献

- 1) 嶋村 公二, 細川 晃, 上田 隆司, 政 誠一: PVD コーティング工具による難削材の高効率・高精度切削(第 1 報) —UBMS 法による TiCN コーティングエンドミルを用いた SUS304 の高速乾式切削—, 精密工学会誌, **76**, 10 (2010) 1182.
- 2) 細川 晃, 小田 健作, 山田 啓司, 上田 隆司: 断続切削における工具逃げ面温度 —高速エンドミル加工に関する研究(第 1 報)—, 精密工学会誌, **66**, 11 (2000) 1786.