

コーテッド工具のハードミリングにおける切削特性*

— コーテッド工具のコーティング膜材質と母材の影響 —

岡田将人** 細川 晃*** 田中隆太郎*** 上田隆司***

Cutting Characteristics of Coated Carbide Tools in Hardmilling
— Influence of Coating Film and Base Material of Coated Carbide Tool —

Masato OKADA, Akira HOSOKAWA, Ryutaro TANAKA and Takashi UEDA

The cutting performance of some coated carbide tools in hardmilling of hardened steel is investigated. The cutting characteristics are mainly evaluated by tool wear and temperature at flank face for four types of coating films on two types of base materials. Cutting force and surface roughness are also examined. The temperature of cutting tool is measured using a two-color pyrometer with an optical fiber. The tool flank wear becomes large in the case of TiN and TiCN coated tools. The tool flank temperature increases with the increase of surface roughness of coated film, and reaches approximately 500°C for TiAlN/AlCrN coated tool. On the other hand, the cutting forces do not change so much with surface roughness of coated film. In the case of P30-grade cemented carbide as base material, tool flank wear and flank temperature become large compared with K10-grade. The surface roughness of workpiece increases with the increase in tool flank temperature more than approximately 530°C.

Key words : hard milling, coated carbide tool, hardened steel, tool wear, tool temperature, two-color pyrometer

1. 緒 言

近年、工作機械の高剛性化、高精度化の進展ならびに金型や自動車部品などに用いられる焼入れ鋼、鋳鉄、高硬度難削材などを対象とした機械加工の要求の高まりとともに、切削工具に対してより過酷な条件下での高寿命化が求められている。特に工作物の高硬度化は切削温度の上昇を招きやすく、工具摩耗を促進する。そして、工具摩耗の促進による切削性能の低下は連鎖的に切削温度を上昇させ、加工精度、仕上げ面性状の劣化などの要因となるため、切削工具には特に耐摩耗性と耐熱性が要求される。

このような背景の下、著者らは、cBN 工具を高硬度焼入れ鋼の高速エンドミル加工に適用し、その有効性について主として耐熱性の観点から検討した¹⁾。その結果、cBN 工具は高硬度で高温強度が大きく、耐摩耗性、耐熱性に優れるのみならず、熱伝導率が大きいため工具温度が低く抑えられ、切削速度 600m/min の高速域まで適用できることを示した。しかし、通常の切削工具に比べてコスト高になることは否めない²⁾。

ところで、コーテッド工具は母材となる超硬合金工具の表面に、TiCN や TiAlN などの硬質薄膜を単層または複数層被覆して、切削工具としての性能を高めた工具である。cBN 工具に比べ高温硬度が低く高速ハードミリングには適さないが、安価で実用性が高く、切削温度が高温とならない低速域でのハードミリング用として期待されている³⁾。

そこで本研究では、焼入れ鋼のエンドミル加工へのコーテッド工具の有効性について、主として耐摩耗性、耐熱性の観点から検討することを目的とし、コーティング膜材質、母材材質の異なる 5 種類の工具を用いて、これらが工具逃げ面摩耗、工具

逃げ面温度、切削抵抗に及ぼす影響を明らかにしている。また、仕上げ面あらさについても検討を加えている。

2. 実験方法

2.1 光ファイバ型 2 色温度計

工具逃げ面の温度測定には、光ファイバ型 2 色温度計を用いた。温度計の構造を図 1 に示す。本温度計を用い、切削時に工具逃げ面からふく射される赤外線を経由して光ファイバにより非接触で受光し、赤外線検出素子に伝送することで回転体の過渡的な温度を測定する。赤外線検出素子には、分光感度波長域がそれぞれ 0.5 ~ 3.0 μm および 3.0 ~ 5.6 μm と異なる InAs 素子および InSb 素子を用いた。いずれの素子も、赤外線が入射することにより起電力を生じる光起電力型素子であり、両素子を同一光軸上で積層構造に一体化したものを温度計に搭載している。本温度計は両素子の出力比から温度を求めるため、その測定感度は測定対象物のふく射率に依存しない特徴を有している。また 400 kHz までの入力に対して安定した出力が得られ、高速切削中の工具温度を計測するのに十分な応答速度を有している⁴⁾。

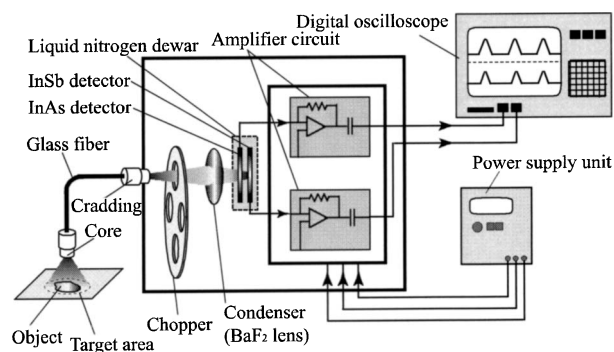


Fig.1 Structure of two-color pyrometer with an optical fiber

* 原稿受付 平成 20 年 9 月 30 日
** 正 会 員 福井工業高等専門学校 (福井県鯖江市下司町)
*** 正 会 員 金沢大学 (石川県金沢市角間町)

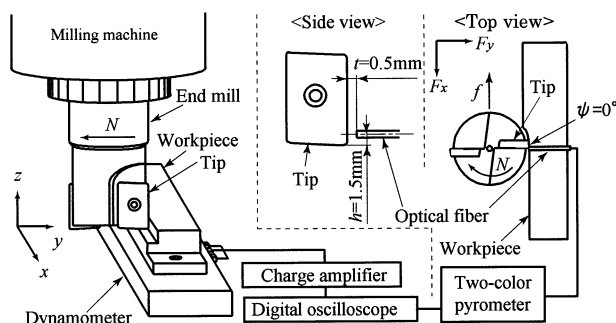


Fig.2 Experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Cutting tool	Throw-away type end mill Diameter $D = 25$ mm Axial rake $\gamma_a = +7^\circ$, Radial rake $\gamma_r = -4^\circ$ Base material: K10-grade, P30-grade Film material: TiN, TiCN, TiAlN, TiAlN/AlCrN
Workpiece	Carbon steel: S55C (Full-hardened; 60HRC)
Cutting speed	$v = 70$ m/min
Feed per tooth	$f = 0.05$ mm/tooth
Depth of cut	Radial; $R_d = 0.2$ mm, Axial; $A_d = 3$ mm
Cutting style	Down-cut without coolant

2.2 実験方法

図2に実験装置の概略を、表1に主な実験条件を示す。実験は、立形マシニングセンタ (CV-500A, 株式会社森精機製作所製) に、スローアウェイ型エンドミル (2枚刃; うち1枚はダミーチップ) を取り付けて、焼入れ鋼 S55C (60 HRC) の乾式側面加工を行い、切削抵抗と工具逃げ面温度をインプロセスで測定した。切削抵抗の測定には、圧電センサを組み込んだ3軸切削動力計を用い、チャージアンプを介してストレージスコープに出力波形を記録した。エンドミル加工における切削抵抗は工具の回転にともない変動し、得られる出力はパルス状となる。本論文では切削抵抗は各方向成分の切削パルス毎の最大値としている。なお、インパルスハンマを用いたFFT解析により、動力計の測定環境における固有振動数は3成分とも3 kHz以上であり、本実験において動特性の観点から測定に問題ないことを確認している。工具逃げ面温度の測定は工作物にけた貫通穴 ($\phi 1.1$ mm) に光ファイバ (コア径 300 μm) を挿入し、温度が最高点に達する工具回転ごとの切削終了時点 (図2における $\psi = 0^\circ$) における工具逃げ面温度を測定した。測定位置は図2に示すように軸方向切り込み量 ($A_d = 3$ mm) の中央位置となる外周刃の切れ刃先端から $h = 1.5$ mm とした。

工具には、超硬合金工具 K10 種を母材とし、その表面に TiN, TiCN, TiAlN, TiAlN/AlCrN をコーティングした4種類ならびに超硬 P30 種を母材とした TiAlN コーテッド工具を用いた。TiN, TiCN, TiAlN は単層コーティングであるのに対し、TiAlN/AlCrN は1層の膜厚がナノメートルオーダーの TiAlN と AlCrN の超薄膜を相互に約 1000 層積層させた超多層コーティングである。

図3に工具刃先の SEM 写真と模式図を、表2、表3に母材である超硬合金とコーティング膜材質の主な特性値を示す。図2に示すように、工具は図中の破線を境界として、それぞれ刃先周辺にネガランド -15° 、ネガランド幅 0.13 mm にチャンファ処理されている。そのため、本実験は負のすくい角を有する工具により切削が行われることになる。表2より母材材質は機械的な特性に大きな違いはないが、熱的特性として超硬 K10 種が高い熱伝導率・熱拡散率を有していることがわかる。表3より膜材質

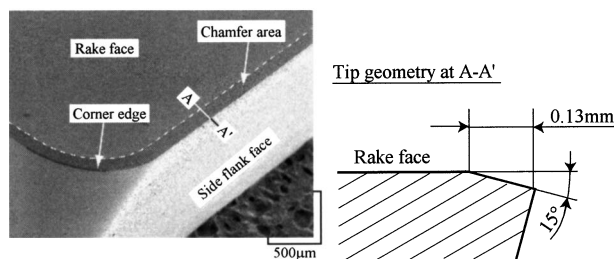


Fig.3 Form of cutting edge

Table 2 Physical properties of base materials

		K10-grade	P30-grade
Hardness	HRA	91.1	91.2
Young's modulus	$\times 10^4$ kg/mm ²	6.4	5.3
Thermal conductivity k W/(m·K)	(@ 20 / 500 / 900 °C)	91.7 / 74.7 / 68.1	28.6 / 35.8 / 41.1
Thermal diffusivity $a \times 10^{-6}$ m ² /s	(@ 20 / 500 / 900 °C)	31.9 / 18.9 / 15.0	9.8 / 8.8 / 8.8

Table 3 Physical properties of film materials

		TiN	TiCN	TiAlN	TiAlN/AlCrN
Hardness*1	mgf/ μm^2	3745	4807	4353	5047
Surface roughness	R_a μm	0.52	0.42	0.71	0.87
Film thickness	μm	4.0	3.6	2.9	3.0
Thermal effusivity	J/(s ^{0.5} ·m ² ·K)	12141	13513	3027	3518
Oxidizing temperature ⁹⁾ °C		600	500	800	1000

*1: Nano-indentation test

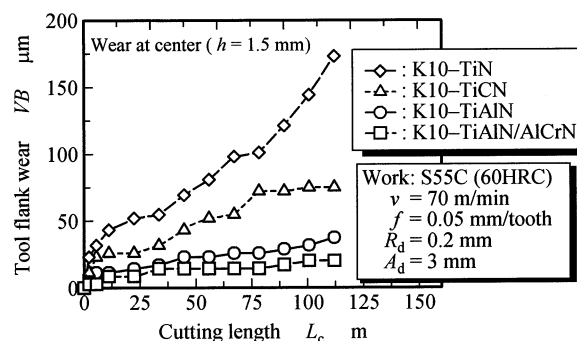


Fig.4 Relationship between cutting length and tool flank wear

の特性は TiAlN/AlCrN が最も高い硬度と酸化開始温度を有していることがわかる。また、TiCN は高い硬度を有するが酸化開始温度が低いのにに対し、TiAlN は、硬度が TiCN より劣るが比較的高い酸化開始温度を有している。膜表面の粗さは TiCN が最も低く、良好な表面性状であるのに対し、TiAlN, TiAlN/AlCrN は粗さが大きい。膜厚はいずれも 3.0 ~ 4.0 μm 程度である。表3にある熱浸透率とは熱物性値の一つであり、その膜材質が熱を奪い取る能力を示す。本研究では、薄膜微小領域の熱浸透率が測定可能なレーザ熱反射法⁶⁾により測定しており、TiN, TiCN の値が比較的高いことがわかる。なお、表2、表3における工具物性値は酸化開始温度を除き実測値を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 工具逃げ面摩耗

図4に超硬 K10 種を母材とする4種類のコーテッド工具を用いて切削したときの切削距離 L_c と工具逃げ面摩耗幅 VB の関係を示す。ここで、 VB とは、工具逃げ面温度測定部である $h = 1.5$ mm の部分における最大摩耗幅と定義した。また、切削距離 L_c とは切削時に切れ刃が工作物と接触した実際の長さを示し、(1 刃あたりの接触弧長さ) \times (切削回数) で算出した値である。いずれ

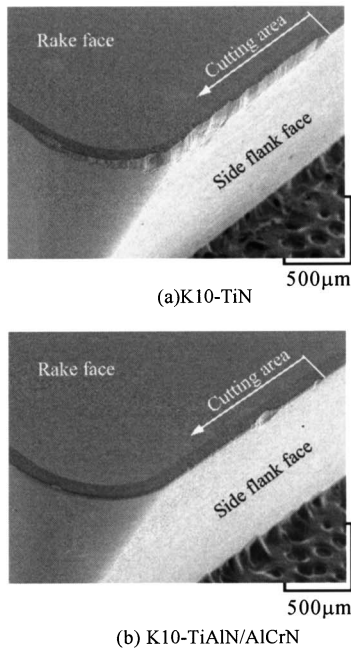


Fig.5 Cutting edge form of worn tool

の膜材質においても L_c の増加により VB が増加しており、切削の進行とともに工具逃げ面に摩耗が生じていることがわかる。しかしながら、その大きさは膜材質により大きく異なり、 $L_c=112\text{ m}$ において TiN が $VB=175\text{ }\mu\text{m}$ であるのに対し、TiAlN/AlCrN は $VB=20\text{ }\mu\text{m}$ と、その差は約 $155\text{ }\mu\text{m}$ にもなる。

図5に $L_c=112\text{ m}$ における TiN と TiAlN/AlCrN の工具刃先部の SEM 写真を示す。図にみるように、TiN の工具刃先稜線は明確な変形が認められチャンファ部が後退しているのに対し、TiAlN/AlCrN は局所的な摩耗は認められるものの、比較的鋭利な刃先形状を保っていることがわかる。一般的に工具の耐摩耗性は高温硬度に依存するとされており、これはコーテッド工具の場合、常温時の膜材質硬度ならびに高温時の膜材質硬度に影響を及ぼす酸化開始温度に依存することになる。そのため、高い硬度ならびに酸化開始温度を有する TiAlN、TiAlN/AlCrN の VB が小さく、硬度が低い TiN ならびに硬度が TiAlN より高いが酸化開始温度が低い TiCN の VB が大きくなったと考えられる。また、コーティング膜に Al を含有することにより、切削時の高温環境下において選択的に Al が酸化して膜表面に Al 酸化物の層を形成し膜内部の酸化を防止する効果も報告されており、これも TiAlN、TiAlN/AlCrN の VB が小さい一因と考えられる。

図6に $L_c=112\text{ m}$ における TiAlN/AlCrN の均一摩耗部の SEM 写真を示す。写真にみるように工具表面は4層で構成されており、上からチャンファ部のコーティング膜表面、コーティング膜断面、母材露出面、工具逃げ面のコーティング膜表面と考えられる。図中の写真は超硬 K10 の SEM 写真で、母材露出面と考えられる部分と同様の組織であることがわかる。このときの TiAlN/AlCrN の VB は $20\text{ }\mu\text{m}$ であることから、コーティング膜の耐熱性や母材との密着性が良好ならば、母材が局部的に露出しても、工具摩耗が急激に進むことがないと言える。

3.2 工具逃げ面温度

図7は図4における切削距離 L_c と工具逃げ面温度 θ_a の関係を示したものである。TiAlN/AlCrN の場合を除き、 L_c の増加とともに θ_a が上昇しており、TiN の場合が最大でその差は 100°C 程度となっている。 L_c の増加によって VB が進行していることから、それぞれの膜材質の温度上昇量の違いは工具摩耗による刃先の鈍

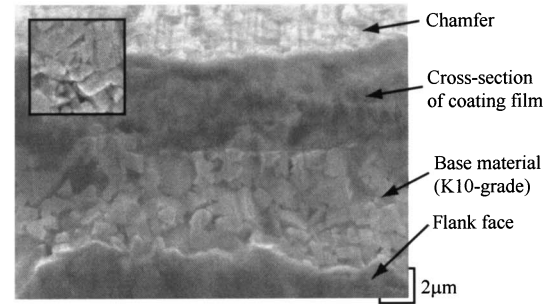


Fig.6 Denudation of base material

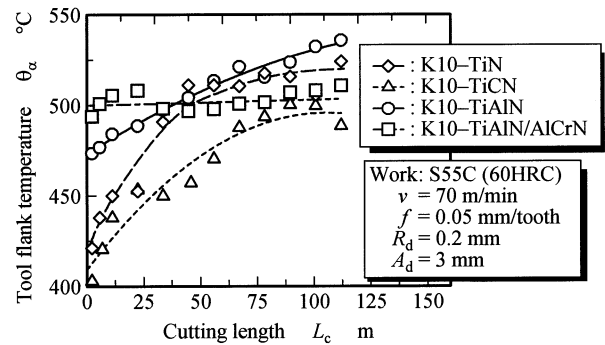


Fig.7 Relationship between cutting length and tool flank temperature

化による影響と考えられる。

一方、 L_c が進行していない初期の θ_a は TiCN が約 400°C であるのに対し、TiAlN/AlCrN は約 500°C となっており、膜材質による θ_a への影響が認められる。これは、コーティング膜の表面粗さと熱浸透率が影響していると考えられる。工具表面粗さは、その工具の摺動特性と関係し、表面粗さが大きいと切削時の工具すくい面と切りくず間ならびに工具逃げ面と仕上げ面間で生じる摩擦熱も大きくなると考えられる。また、熱浸透率が低い場合、発生した熱エネルギーは工具内部へ浸透されにくく、表面を加熱することも推察される。そのため、表3に示すように4種類の膜材質の中で最も表面粗さが大きく、比較的熱浸透率が低い TiAlN/AlCrN が最も高い θ_a を示したと考えられる。なお、著者らのハードターニングにおける実験では、工具逃げ面温度は主として母材の熱特性に依存し、コーティング膜材種の影響は小さい結果を得ている。ミリングのような断続切削では工具は瞬間的に加熱されるため、コーティング膜の影響が現れたとも考えられる。ところで、前述したように TiCN が比較的硬度が高いにもかかわらず、TiAlN に比べ VB が大きくなっているが、これは主として膜の耐熱性によるものと考えられる。TiCN の θ_a をみると、 L_c の進行とともに最大で約 500°C に達しており、これは TiCN の酸化開始温度に近い (TiAlN は約 800°C)。断続的ではあるが、切削中の TiCN が酸化開始温度付近の環境下にあったことが要因であろう。

3.3 切削抵抗

図8、図9は図7における送り分力 F_x 、背分力 F_y を示したものである。なお、厳密には工具の回転にともなって工具の接線および法線方向は変化するが、本実験では工具-工作物接触角がおおよそ 10° と小さいため、切削抵抗は工具位置に関わらず送り分力 F_x 、背分力 F_y で評価している。いずれの膜材質においても、 L_c の増加にともない F_x 、 F_y が増加していることがわかる。特に、 F_y がその増加傾向が顕著で、TiN の場合 $L_c=1.12\text{ m}$ においておおよそ 250 N であるのに対し、 $L_c=112\text{ m}$ になると 1500 N 程度

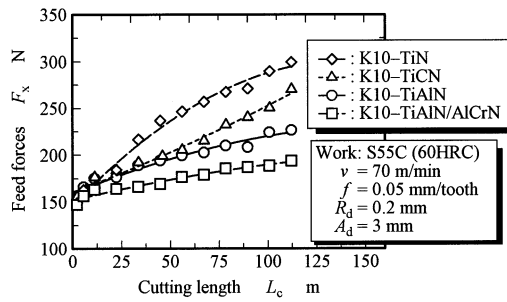


Fig.8 Relationship between cutting length and feed force

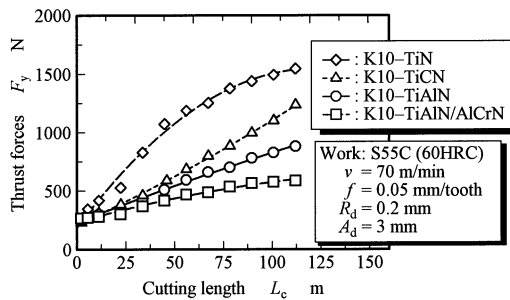


Fig.9 Relationship between cutting length and thrust force

まで上昇している。これらの切削抵抗の増加は、 VB の進行により工具刃先が鈍化し、切削に要するエネルギーが増大したことに起因すると考えられ、これが前述した工具逃げ面温度 θ_a の L_c による増加に直接的に関係すると考えられる。また、 VB が進行していない初期の F_x 、 F_y をみると、いずれの膜材質においてもほぼ同じであることがわかる。 F_x 、 F_y は切削パルス毎の最大値で工具食いつき直後が測定点となり、これは工具食いつきによる衝撃の影響を反映した値である。前述した通り、初期の θ_a に膜材質による大きな違いが認められたのは、コーティング表面の粗さとコーティング膜材質の熱的特性によると考えられ、これらの影響は工具食いつき時の切削抵抗には反映されない。そのため、初期の F_x 、 F_y に膜質による大きな違いは認められないと考えられる。

3.4 工具母材材質による影響

図10にK10-TiAlNおよびP30-TiAlNで切削したときの切削距離 L_c と工具逃げ面摩耗幅 VB の関係を、図11に L_c と工具逃げ面温度 θ_a の関係を示す。ここで、P30-TiAlNにおいては $L_c=89.6$ mまでの結果を示している。図より、 VB は $L_c=56$ mまでは両者とも同様の傾向を示しているが、それ以降はP30の場合が急激に VB が増加していることがわかる。 $L_c=56$ mにおける両者の VB は $23 \mu\text{m}$ であり、これは前述のコーティング膜の摩耗により母材の露出が確認された摩耗量と同等である。このことから、 VB の母材材質による影響は母材が露出することにより顕著に発現すると考えられる。この場合、K10はP30に比べ耐逃げ面摩耗性に優れ高硬度鋼に適した工具であることから、このような結果が得られたと考えられる。また、 VB が進行していない初期の θ_a はP30がK10より 20°C 程度高いことがわかる。工具の熱的特性が工具逃げ面温度に及ぼす影響については明らかにされており¹⁾、この場合も表2に示すようにP30の熱伝導率・熱拡散率がK10のそれより低いとみられる。3.2節でも記述しているが、ミリングにおいては、コーティング膜の材種や膜厚が工具温度にどの程度影響を及ぼすかについては明確ではなく、今後の課題である。

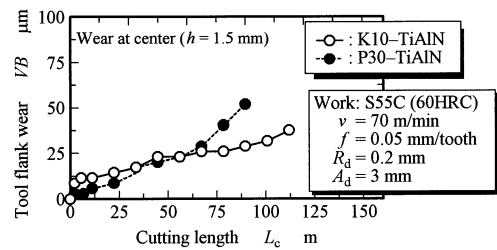


Fig.10 Influence of base material on tool flank wear

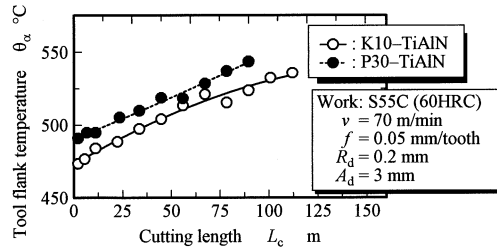


Fig.11 Influence of base material on tool flank temperature

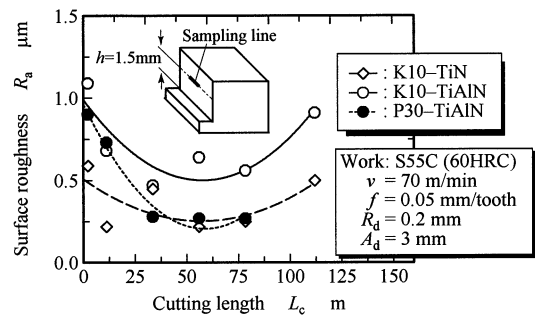


Fig.12 Relationship between cutting length and surface roughness

3.5 仕上げ面粗さ

図12にK10-TiN、K10-TiAlN、P30-TiAlNで切削を行った場合の切削距離 L_c と仕上げ面粗さ R_a の関係を示す。粗さ測定は、送り方向の2次元仕上げ面粗さであり、図中に示すように θ_a を測定した工作物中央付近で、外周刃の切れ刃先端より $h=1.5$ mmの部分で切削された仕上げ面を対象としている。図にみるように、 $L_c=1.12 \sim 78.4$ mにおいて VB の進行により R_a が減少傾向を示しているのに対し、K10-TiN、K10-TiAlNの $L_c=78.4$ m以降は増加傾向に転じていることがわかる。なお、これ以外の膜材質(K10-TiCN、K10-TiAlN/AlCrN)では同様の減少傾向は示すが、それ以降の増加傾向はみられず、 $L_c=112$ mにおいて $R_a=0.25 \mu\text{m}$ 程度と比較的良好な表面性状を示した。

図13は図12の結果について工具逃げ面温度 θ_a と R_a の関係について示したものである。図より、いずれの膜材質においても $\theta_a=500 \sim 530^\circ\text{C}$ において粗さが最小点となり、K10-TiN、K10-TiAlNにおいては増加傾向に転じる変極点をなしていることがわかる。一般的に構成刃先はすくい面温度が工作物の再結晶温度以上になると消失するとされており、牧野⁸⁾は炭素鋼の旋削において、消失温度を約 $750 \sim 800^\circ\text{C}$ と報告している。また、中山⁹⁾は同様に炭素鋼の旋削において、負のすくい角を有した工具を用いた場合、構成刃先の消失温度が正の場合より低下することを明らかにしており、藤村¹⁰⁾は、工具逃げ面温度はすくい面温度の7~8割程度であることを報告している。以上のことから、 θ_a が $500 \sim 530^\circ\text{C}$ までの領域における仕上げ面粗さの減少は構成

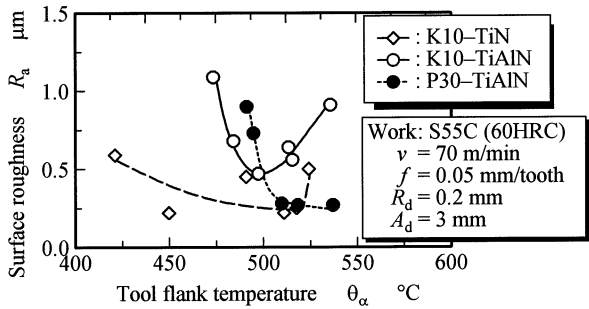


Fig.13 Relationship between tool flank temperature and surface roughness

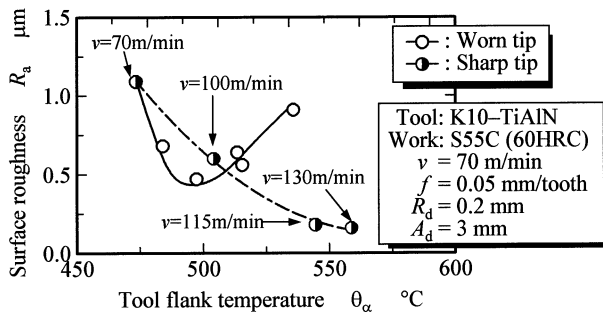


Fig.14 Influence of cutting edge form on surface roughness

刃先もしくはこれに類する凝着現象の消失により表面性状が向上したためと考えられる。

一方、図14にほとんど摩耗していないK10-TiAlN工具を用いて、切削速度 v を高速にすることにより θ_α を変化させた場合の θ_α と R_a の関係を図13の同工具の結果(○印)と併せて示す。図より、未摩耗工具では R_a は θ_α の上昇とともに減少していることから、図13中の $\theta_\alpha=500^\circ\text{C}$ 以降の R_a の増加は θ_α による影響でなく、VBの進行による工具切れ刃形状の変化が影響していると考えられる。図15にK10-TiAlNで得られた L_c による断面曲線の一例を示す。図より、 $L_c=2.24\text{ m}$ の断面曲線の凹凸は規則的でなく、構成刃先や凝着による面荒れの影響と推定されるのに対し、 $L_c=112\text{ m}$ の場合は比較的周期的に長波長の凹凸が確認できる。このことから、 $\theta_\alpha=500^\circ\text{C}$ 以降における表面粗さの増加は工具摩耗によるものと考えられる。しかしながら、 $\theta_\alpha=500^\circ\text{C}$ 付近で温度変化が認められず最も摩耗が小さいK10-TiAlN/AICrNや、 $\theta_\alpha=500^\circ\text{C}$ 以下で温度変化が認められ、K10-TiAlNより摩耗の大きいK10-TiCNの R_a が、 L_c の進行による増加傾向が認められなかったことから工具温度、工具摩耗以外にコーティング膜材質など種々の影響により仕上げ面性状が決定されるといえる。

4. 結 言

種々のコーテッド工具を用いて焼入れ鋼のハードミリングを行い、コーティング膜材質や母材材質が工具逃げ面摩耗、工具逃げ面温度、切削抵抗ならびに仕上げ面性状に及ぼす影響について検討した。以下にその結果をまとめる。

- (1) コーティング膜材質により、工具逃げ面摩耗幅の進行が大きく異なる。高い硬度と酸化開始温度を有し、Alを含むコーティング膜材質の逃げ面摩耗幅が小さい。
- (2) 工具逃げ面温度はコーティング膜表面の粗さが大きく、膜材質の熱浸透率が低いほど顕著に増加し高温となる傾向がみられる。また、切削抵抗に膜材質の影響はみられない。

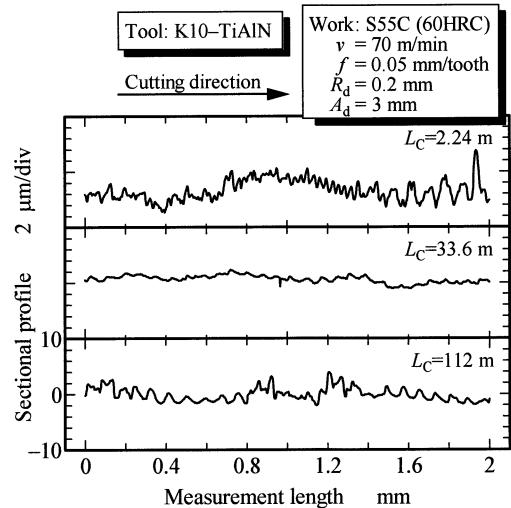


Fig.15 Sectional profile of K10-TiAlN

- (3) 工具逃げ面摩耗は母材の露出により母材材質の影響を大きく受ける。また、工具逃げ面温度への母材材質の熱的特性の影響は限定的である。
- (4) 仕上げ面性状は工具温度、工具摩耗、コーティング膜材質の影響により、切削距離に対して顕著にその傾向が変化する。特に工具逃げ面温度が $500 \sim 530^\circ\text{C}$ 程度に達する場合、表面粗さが増加する傾向がみられる。
- (5) ハードミリングにコーテッド工具を適用する場合、コーティング膜材質は、高い硬度と酸化開始温度を有したものが有効であり、本実験の場合、TiAlN/AICrNが耐摩耗性、耐熱性の観点から最もハードミリングに適していた。これらのことからコーテッド工具は、低速域でのcBN工具の代替工具としてハードミリングに適用可能であるといえる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、マシニングセンタの無償貸与をいただいた財団法人工作機械技術研究財団(MTTRF)ならびに切削工具のご提供をいただいた住友電工ハードメタル株式会社に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 細川晃, 岡田将人, 北川修介, 田中隆太郎, 上田隆司: cBN工具によるハードミリング—高速エンドミル加工に関する研究(第2報)—, 精密工学会誌, **73**, 2 (2006) 6.
- 2) 升田雅博, 野上輝夫, 溝渕啓, 長濱司: 焼入れ合金工具鋼の高速エンドミル加工時の工具寿命と切削温度, 精密工学会誌, **66**, 11 (2000) 1745.
- 3) 山田保之, 池田孜: コーテッド工具, 精密工学会誌, **61**, 6 (1995) 778.
- 4) 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.
- 5) 精密工学会編: 精密加工実用便覧, 日刊工業新聞社 (2000) 94.
- 6) 羽島仁人, 太田弘道: 微細構造材料の局所熱物性計測—サーモリフレクタンス法の新展開—, まてりあ, **43**, 2(2004) 129.
- 7) 山田保之, 青木太一, 田中裕介, 脇平浩一郎: コーティッド超硬工具による高硬度材の切削, 日本機械学会論文集C編, **60**, 577 (1994) 2906.
- 8) 牧野亮哉, 貴志浩三, 星光一: 低炭素鋼切削における構成刃先現象, 精密機械, **39**, 458 (1973) 299.
- 9) 中山一雄, 井口和文: 構成刃先の研究 (第1報), 精密機械, **22**, 253 (1956) 104.
- 10) 藤村善雄, 河端裕, 新谷一博: 工具逃げ面の摩耗面における温度分布, 精密機械, **42**, 495 (1976) 268.