研 究

焼結ステンレス鋼切削における工具摩耗

和田 任弘

奈良工業高等専門学校機械工学科, 〒 639-1080 大和郡山市矢田町 22.

Tool Wear in Cutting of Sintered Stainless Steel

Tadahiro Wada

Department of Mechanical Engineering, Nara National College of Technology, 22 Yata-cho, Yamatokoriyama 639-1080.

Received March 9, 2001

SYNOPSIS

The tool life in turning of the sintered steels becomes shorter than that in turning of the melted steels such as carbon steels. In order to clarify the effective tool materials for the turning of the sintered stainless steel, the tool wear is experimentally investigated. The sintered stainless steel was turned with the various tool materials at the cutting speed from 1.67 m/s to 5 m/s. The main results obtained are as follows: (1) In the conventional tool materials, the cemented carbide tool (coated by TiVN PVD) is the most effective tool material for the turning of the sintered stainless steel. (2) In the three kinds of CBN tools, the tool wear of the CBN tool with TiN binder increases slower than those of the CBN tool with Al_2O_3 , TiC binder. (3) The CBN tool with TiN binder gets a better surface finish than the CBN tool with Al_2O_3 binder. Therefore, the CBN tool with TiN binder is the most effective tool material for the turning of the sintered stainless steel.

KEY WORDS

turning, sintered stainless steel, tool wear, surface roughness, SUS316L

1 緒 言

耐食性を要求される焼結部品には、焼結ステンレス鋼が使用される¹⁾。焼結部品は、焼結後できるだけ切削などの機械加工をしなくてすむように設計するのが望ましいが²⁾、寸法精度が要求される場合には切削が行われる。焼結部品の切削においては、焼結材料は気孔を含有し、熱伝導率が低いなどの理由で被削性はあまり良くないとされている³⁾。さらに、焼結部品は多量に生産されるので耐摩耗性に優れ、しかも能率を高めるために高速度切削が可能な工具材を選定する必要がある。これには、耐熱・耐摩耗性に優れたセラミックスやc-BNが有効な工具材と考えられる。しかし、焼結ステンレス鋼切削におけるセラミックスやc-BNの工具摩耗を調べた研究は見あたらない。そこで、他の文献を参考にすると、焼結鋼切削においては、TiC含有量の多いアルミナ系セラミックスが有効である⁴⁾としている。しかし、溶製材としてのステンレス鋼切削においては、アルミナセラミックスはNiやTiとも反応を起こして異常摩耗を生じるので、これらを多く含有する材料の切

削には注意が必要である⁵⁾との報告もある。また、c-BNで焼結ステンレス鋼を切削する場合、c-BNの結合材は工具摩耗に大きな影響を与える^{4,6-8)}ため、焼結ステンレス鋼に適した結合材を選定する必要がある。一方、横穴など成形困難な場合にも切削が行われる。この場合、工具材には耐欠損性・耐摩耗性に優れていることが要求される。これには、耐欠損性に優れた超硬合金を母材とし耐摩耗性に優れたセラミックスをコーティングしたコーテッド超硬合金が有効な工具材と考えられる。しかし、焼結ステンレス鋼切削におけるコーテッド超硬合金の工具摩耗を調べた研究も見あたらない。

そこで本研究では、焼結ステンレス鋼(SUS316Lに相当)切削時に適した工具材を明らかにするために、超硬合金、コーテッド超硬合金、セラミックス、およびc-BNの工具摩耗を調べた。

2 実験方法

被削材として使用した焼結ステンレス鋼の化学成分および

機械的性質を Table 1 に示す。被削材焼結ステンレス鋼の引張り強さは 200~350MPa、硬度は HB94 である。Fig.1 に、焼結ステンレス鋼の組織写真を示す。黒い部分が気孔である。

使用工具材は、超硬合金 P10, K10 種, Table 2 に示すコーテッド超硬合金, セラミックスおよび c-BN である。コーテッド超硬合金は、超硬合金 K10 種を母材に、TiN, TiVN, TiAlN を PVD 被覆したもの、および TiN-TiCN-Al₂O₃-TiN を多層 CVD 被覆したものである。セラミックスは、Al₂O₃ セラミックス, Al₂O₃ と TiC の含有量の異なる Al₂O₃-TiC セラミックスおよび Si₃N₄ セラミックスを用いた。c-BN については、TiC, Al₂O₃, TiN 結合材の c-BN を用いた。なお、c-BN 含有率は、いずれの c-BN も 60~65 vol.% である。

□25×25 バイトホルダに、TNGA160408, TNMA160408, あるいは TNGN160408 型チップを取付け使用した。この場合の工具形状は、いずれのチップも -6°, -6°, 6°, 6°, 30°, 0°, 0.8mm となる。また、いずれのセラミックス, c-BN の工具切れ刃には (0.1~0.2 mm×25°) のチャンファホーニングが施されている。

使用旋盤は、無段変速装置付き昌運工作所製 ST5×1000 型高速精密旋盤 (7.5/11kW, 8~2500rpm) である。

Table 3 に示す切削条件で焼結ステンレス鋼の外周旋削を行い、工具摩耗、仕上げ面粗さなどを調べた。仕上げ面粗さの測定には、東京精密社製サーフコム 1800A 型触針式表面粗さ測定器を用い、送り方向の仕上げ面のプロフィールを記録した。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties.

Cr	Ni	Mo	Si	Mn	C	Fe
16~18	12~15	2~3	<1.5	<2	<0.03	Bal.
Mechanical properties		Tensile strength		200~350MPa		
		Brinell hardness		HB94

Fig.1 Microstructure of sintered stainless steel.

3 実験結果および考察

3.1 切りくず形状

切りくず形状は切りくずの処理性に直接影響する⁹⁾。そこで、焼結ステンレス鋼旋削時に得られた切りくずを調べた。Fig.2(a)に、焼結ステンレス鋼を TiN コーテッド超硬合金工具で旋削した場合に得られた切りくずを示す。切削速度は 5.0m/s である。ここでは示していないが、引張り強さ 600MPa の焼結鋼を切削すると不連続形切りくずが生成された⁹⁾。これは、被削材の伸びが小さいため被削材内部に存在する気孔の部分で切削が不連続になり、切りくずが折れやすくなるためである。しかし、Fig.1 に示したように焼結ステンレス鋼内部にも気孔が存在するが、連続形切りくずが生成される。これには、次の理由が考えられる。Fig.2(b)に Fig.2(a)で示した切りくずの断面を示す。Fig.2(b)中に示す A, B 部いずれの部分も大きな気孔は存在せず、気孔が押しつぶされ線状となっている。このことから、焼結ステンレス鋼の伸びが大きいこと、気孔が押しつぶされることにより連続形切りくずが生成されたと考えられる。

3.2 コーテッド超硬合金工具

3.2.1 工具の摩耗状態

焼結ステンレス鋼を各種工具材で旋削し、工具の摩耗状態を調べた。その結果を、Fig.3 に示す。切削速度は、5.0m/s の場合である。(a)に示す超硬合金 K10 種工具の場合、コーナ部

Table 2 Tool materials.

Tool	Tool material
Coated A	K10 (TiN*)
Coated B	K10 (TiVN*)
Coated C	K10 (TiAlN*)
Coated D	K10 (TiN-TiCN- Al ₂ O ₃ -TiN**)
Ceramics W	Al ₂ O ₃ (100%)
Ceramics B	Al ₂ O ₃ (70%)-TiC(30%)
Ceramics T	Al ₂ O ₃ (30%)-TiC(70%)
Ceramics S	Si ₃ N ₄
CBN C	c-BN (TiC binder)
CBN D	c-BN (Al ₂ O ₃ binder)
CBN N	c-BN (TiN binder)

*: PVD process

**: CVD process

Table 3 Cutting conditions.

Cutting speed	V=1.67, 5.0 m/s
Feed rate	S=0.2 mm/rev
Depth of cut	a=0.1 mm
Cutting method	Dry

Fig.2 Chip obtained in turning of sintered stainless steel. (a) Chip configuration. (b) Cross section of chip shown in Fig.(a).

の逃げ面が三角形状に大きく摩耗している。さらに、刃先後退量もかなり大きい。(b),(c)にそれぞれ示すコーテッド超硬合金工具A,Bの場合、コーティング層の顕著な剥離は見られない。これに対し、(d)に示すコーテッド超硬合金工具Dの場合、コーナ付近のすくい面にコーティング層の剥離が見られ、さらに逃げ面に凝着物が見られる。

3.2.2 工具の摩耗進行

焼結ステンレス鋼を2種の超硬合金工具で切削し、工具の摩耗進行を調べた。Fig.4に、その結果を示す。切削速度は1.67m/sの場合で、超硬合金K10種工具については切削速度5.0m/sの場合も示す。切削速度1.67m/sの場合、超硬合金K10種工具の摩耗進行は遅く、40分切削後の逃げ面摩耗幅の最大値は0.2mm程度である。超硬合金K10種工具の摩耗進行が遅くなるのは、超硬合金K10種の熱伝導率(79W/m・K)が超硬合金P10(29W/m・K)に比べ大きい¹⁰⁾ので、切削温度が上昇しにくくなり工具の摩耗進行が遅くなったと考えられる。そこで、超硬合金K10種工具については、さらに切削速度を5.0m/sに大きくして焼結ステンレス鋼の切削を行った。その結果、超

Fig.3 Tool wear.

Fig.4 Relation between cutting distance and flank wear width.

硬合金K10種工具の摩耗進行は切削速度の増加につれ急速になる。

以上のことから、超硬合金K10種は、高速で工具の摩耗進行が速くなるが、超硬合金の中では焼結ステンレス鋼の切削

に有効な工具材であることがわかった。そこで、これを母材とした4種のコーテッド超硬合金工具A, B, C, Dについて、焼結ステンレス鋼の切削を行い工具摩耗を調べた。Fig.5に、切削速度5.0m/sの場合の摩耗進行を示す。コーテッド超硬合金工具Dの摩耗進行は、コーテッド超硬合金工具Bに比べかなり速い。これは、Fig.3(d)に示したようにコーテッド超硬合金工具Dのすくい面には、コーティング層の剥離ならびに凝着物が見られた。このことからコーテッド超硬合金工具Dで焼結ステンレス鋼を切削すると、凝着物が工具に付着しやすくなる。CVD被覆膜は、一般に高温処理であるため密着性に優れるが、母材との熱膨張差に基づく被膜中での残留引張り応力やクラックの発生により、強度が著しく低下する問題がある¹⁰⁾。コーテッド超硬合金工具Dは、この問題に対しかかなり改善されているが、切削距離500m付近で凝着物によりコーティング層が剥離し工具摩耗が急増した。

以上のことから、焼結ステンレス鋼の切削には、TiVN被覆のPVDコーテッド超硬合金工具が有効であることがわかる。

3.3 セラミックス工具およびCBN工具

3.3.1 工具の摩耗状態

4種のセラミックス工具ならびに3種のCBN工具で焼結ステンレス鋼の切削を行い、工具の摩耗状態を調べた。切削速度5.0m/sの場合を、Fig.6に示す。(a)に示すセラミックス工具Wの場合、コーナ部の逃げ面に欠損が見られる。(b)に示すCBN工具Cの場合、コーナ部の逃げ面がやや3角形状に摩耗し、しかも刃先が平らに摩耗している。また、(c)に示すCBN工具Dの場合、送り境界部に欠損が生じている。これに対し、(d)に示すCBN工具Nの場合、境界摩耗や欠損など特徴のある工具損傷はみられない。また、すくい面にも大きなクレータは見られない。

3.3.2 工具の摩耗進行

Fig.7に、切削速度は5.0m/sにおける各種セラミックス工具の摩耗進行を示す。Fig.5に示したコーテッド超硬合金工具の場合と比較すると、 Al_2O_3 セラミックス工具Wの摩耗進行がかなり速く、また2種類の Al_2O_3 -TiCセラミックス工具B, Tの

摩耗進行も速い。これら3種類のセラミックス工具の摩耗進行が速くなるのは、次の理由が考えられる。まず、 Al_2O_3 セラミックス工具Wの場合、凝着物による大きな欠損がみられた。このため、セラミックス工具Wの主な摩耗機構は凝着摩耗と考えられる。これは、工具材であるアルミナセラミックスと被削材中のNiが反応(主として凝着)し⁹⁾、摩耗が大きく

Fig.6 Tool wear.

Fig.5 Relation between cutting distance and flank wear width.

Fig.7 Relation between cutting distance and flank wear width.

Fig.8 Relation between cutting distance and flank wear width.

なったと考えられる。次に、 Al_2O_3 -TiCセラミックス工具B,Tの場合、 Al_2O_3 セラミックス工具Wの場合と同様、凝着によってある程度の摩耗が生じると考えられる。この場合、 Al_2O_3 -TiCセラミックス工具B,Tの抗折力は、セラミックス工具Wに比べ大きい¹²⁻¹⁴⁾ため、凝着物による工具材の破損の程度は小さくなると考えられる。しかし、熱伝導率の小さい焼結ステンレス鋼の切削では、切削温度が高くなると推察される。耐酸化性やFeとの耐反応性についてTiCは Al_2O_3 より劣る¹⁵⁾ことから、 Al_2O_3 -TiCセラミックス工具B,TのTiCが被削材中のFeと反応し、工具摩耗を増大させる。なお、窒化けい素系セラミックス工具Sの場合、顕著な切りくずの凝着は見られなかったが摩耗進行は速い。これは、窒化けい素セラミックスはFeとの反応性が高い¹⁶⁾ためであると考えられる。

以上のことから、焼結ステンレス鋼の切削においては、いずれのセラミックス工具の摩耗進行もPVDコーテッド超合金工具よりも速くなることから、セラミックス工具は焼結ステンレス鋼の切削に有効でないことがわかる。

Fig.8に、CBN工具の場合を示す。TiN結合材のCBN工具Nの摩耗進行が最も遅く、焼結ステンレス鋼の切削に有効であることがわかる。なお、セラミックス工具の中では、 Al_2O_3 セラミックス工具Wの摩耗進行は、 Al_2O_3 -TiCセラミックス工具B,Tに比べ速かった。これに対し、CBN工具においては、 Al_2O_3 結合材のCBN工具Dの摩耗進行は、TiC結合材のCBN工具Cに比べ遅い。これには、次の理由が考えられる。すなわち、 Al_2O_3 結合材のCBN工具Dの場合、セラミックス工具の場合と同様、CBN工具Dの結合材 Al_2O_3 と被削材中のNiが凝着しやすいと考えられる。しかし、セラミックス工具と比べるとCBN工具は一般的に耐欠損性が高い¹⁷⁾ことから、CBN工具Dでは凝着による工具材の破損の程度が小さくなり工具の摩耗進行が遅くなったと考えられる。これに対し、TiC結合材のCBN工具Cの摩耗進行が速くなるのは、上述のように耐酸化性やFeとの耐反応性についてTiCは Al_2O_3 より劣る¹⁵⁾ことから、結合材TiCが被削材中のFeと反応するためと考えられる。

$V=5\text{m/s}$, $S=0.2\text{mm/rev}$, $a=0.1\text{mm}$, Sintered stainless steel

Fig.9 Surface profile curves.

3.3.3 CBN 工具の切削仕上げ面

CBN工具で焼結ステンレス鋼を切削した場合の送り方向の仕上げ面のプロファイル調べた。Fig.9に、切削速度5.0m/sの場合を示す。なお、図中の断面曲線より下側が、被削材焼結ステンレス鋼である。(b),(c)にそれぞれ示すCBN工具D,Nの場合、送り0.2mmをピッチとする送りマークが見られる。これに対し、(a)に示すCBN工具Cの場合、送りマークは、かなり不規則な形状となっている。また、CBN工具Dの場合、送り境界部にやや大きな境界摩耗が生じたため、CBN工具Nの場合に比べ、仕上げ面は粗くなっている。

以上のことから、TiN結合材のCBN工具Nは、耐摩耗性に優れ、また良好な仕上げ面も得られることがわかる。

4 結 言

本研究では、焼結ステンレス鋼を各種工具で旋削し、主として工具摩耗を調べた。

得られた主な結果は、次の通りである。

- (1) 超合金工具の中では、超合金K10種工具が、焼結ステンレス鋼の切削に適した工具である。しかし、切削速度を大きくすると超合金K10種工具の摩耗進行は急速になる。
- (2) 超合金K10種工具を母材とするコーテッド超合金工具で焼結ステンレス鋼を切削すると、TiVN被覆PVDコーテッド超合金工具の摩耗進行は最も遅い。これに対し、CVDコーテッド超合金工具の摩耗進行は急速になり、凝着によるコーティング層の剥離が発生する。
- (3) いずれのセラミックス工具の摩耗進行は急速になり、アルミナセラミックス工具には凝着による欠損が見られる。
- (4) 本研究で使用した工具の中では、TiN結合材のCBN工具の摩耗進行が最も遅く、しかも良好な仕上げ面が得られる。

謝 辞

CBN工具を提供していただきました東芝タンガロイ株式会社、ならびに被削材焼結ステンレス鋼を提供していただきました三菱マテリアル株式会社に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) (社)精密工学会: "新版 精密工作便覧", コロナ社, 東京, (1992)814.
- 2) (社)精密工学会: "新版 精密工作便覧", コロナ社, 東京, (1992)139.
- 3) 鳴瀧則彦, 村越昭男: "焼結鋼の被削性", 精密機械, 47(1981)1516-1522.
- 4) S.Hanasaki, J.Fujiwara and T.Wada: "TOOL WEAR IN HIGH SPEED TURNING OF SINTERED STEELS", Proceedings of the International Conference on Precision Engineering, Y.Lian and N.Ueda ed., Taipei, Japan Society for Precision Engineering, (1997)351-356.
- 5) 鳴瀧則彦: "高速切削におけるセラミック系工具の損傷", 日本機械学会論文集(C編), 58(1992)675-683.
- 6) 新谷一博, 加藤秀治, 前田隆夫, 藤村善雄, 山本明: "インコネル718材加工におけるCBN工具の摩耗特性", 精密工学会誌, 58(1992)1685-1690.
- 7) 新谷一博, 加藤秀治, 藤村善雄, 山本明: "CBN工具によるオーステンパ処理を施したペイナイト球状黒鉛鑄鉄の切削特性", 精密工学会誌, 56(1990)2261-2266.
- 8) 加藤秀治, 新谷一博, 藤村善雄: "ADI材加工におけるCBN工具の摩耗特性", 日本機械学会論文集(C編), 57(1991)3027-3031.
- 9) 中山一雄: "切削加工論", コロナ社, 東京, (1978)188.
- 10) 東芝タンガロイ: "98 東芝タンガロイ切削工具", (1998)623.
- 11) 小林正樹: "硬質膜の加工工具への応用", 精密工学会誌, 59(1993)377-380.
- 12) 日本タングステン: "セラミックス切削工具(KC5050)".
- 13) 東芝タンガロイ: "93 東芝タンガロイ切削工具", (1993)597.
- 14) 尾頭勇, 鈴木淳一郎: "ダクタイル鑄鉄切削用セラミックス工具 HC6", 機械と工具, 9(1988)48-51.
- 15) 鈴木寿: "超硬合金と焼結硬質材料 -基礎と応用-", 丸善, 東京, (1986)228.
- 16) 林桂: "セラミック工具", 精密工学会誌, 61(1995)764-768.
- 17) (社)精密工学会: "新版 精密工作便覧", コロナ社, 東京, (1992)76.