

粉末冶金法高速度鋼工具の切れ刃稜損傷機構について

北川 亮三*・大草喜太雄*・高橋 尚郎**

Tool Edge Wear of P/M High Speed Steel

Ryozo KITAGAWA, Kitao OKUSA and Hisao TAKAHASHI

Abstract

Advantages of P/M high speed steel tools compared with conventional high speed steel tools are due to the former's lack of segregation and coarse particles within thin the crystallized carbide structure. Carbide particles of P/M tools have a uniform distribution range of about $1\ \mu\text{m}$ in diameter, higher toughness, and excellent grindability. After turning and milling operation, the edge of the tools are carefully observed by the scanning electron microscope (SEM) to determine how the uniform distribution of the small carbide particles can affect the sharpenability of the cutting edge. The results show the P/M high speed steel tool minimizes the fall-off of carbide particles on the cutting edge, reduces wear on the flank face, and maintains sharpness of the cutting edge. However, under certain cutting conditions, in which crater wear readily forms on the tool face, the conventional high speed steel tool is superior in terms of tool wear.

1. 緒 言

高速度鋼工具は他の工具材料と比べて靱性にすぐれ、すくい角を大きくとつても欠損に対し強い性質を具備している。このため、切れ刃の鋭利性と靱性が特に要求されるエンドミル加工・ホブ切り・ブローチ加工などの分野で、今でもこの工具材料を広く利用している。

近年、機械部品の加工は高精度、高品質そして低コストを要請されている。一方では、機械部品の信頼性向上のため、その使用材料は高強度化し、それに伴って難削化している。また、低コスト化から切削速度向上による切削の能率向上は切削条件を高速度鋼工具にとって一段と厳しくしている。

これらの事から高速度鋼工具の切削性能を向上する対策は高炭素化や高合金化などの化学成分、製造方法そして熱処理方法の検討によって実施されて来た。しかし、これらの改善策は製造時の鍛造加工や研削加工の能率や歩留りを低下し、工具の機械的性質とくに靱性を低下せる傾向にあった。この原因は高速度鋼の高合金化にともなう晶出炭化物の偏析、粗大化、そして不規則形状により工具の靱性を低下させるからである。

これらの欠点を改善するため、粉末冶金法 (Powder Metallurgy Process 以下 P/M と略す) による P/M 高速度鋼工具¹⁾²⁾³⁾が開発されて、その一部は実用に供されている。

この P/M 高速度鋼工具の切削特性は溶解法のそれと比べ切れ刃稜損傷の分野で、どのような特徴を持っているかについて系統的な研究を殆ど見ない。

そこで、本研究では溶解法の高速度鋼と P/M 高速度鋼工具両者のオーステナイト結晶粒径や炭化物粒径の相違が切れ刃稜の損傷にどのような影響を与えるかについて実験的に検討した。その結果、オーステナイト結晶粒径や炭化物粒径の微細であるものほど、Hall-Petch の関係⁴⁾から P/M 高速度鋼工具の強度は強くなり、切れ刃稜の鋭利性を保持し、切れ刃稜の損傷も受け難いことが分った。

2. 切れ刃稜摩耗機構の検討

鋼の切削加工に用いる高速度鋼工具の常用切削速度は約 $5\sim 50\ \text{m/min}$ と他の工具材料のそれと比較して低速域である。Fig. 1 は切削速度 $40\ \text{m/min}$ 、切削時間 160 分における工具損傷の一例を示す写真である。この切削速度域で鋼を切削すれば、切削工具切れ刃稜

* 生産機械工学科

** 日本高周波鋼業㈱

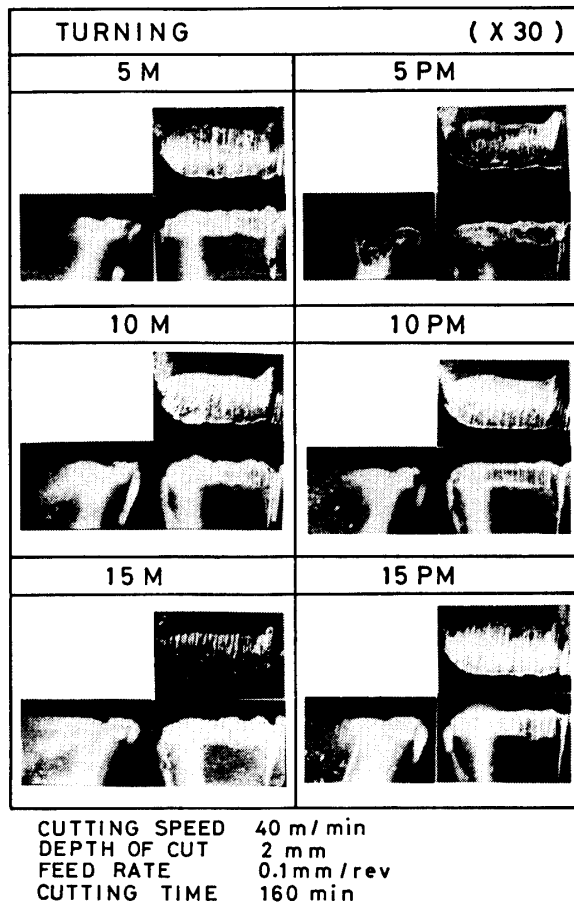
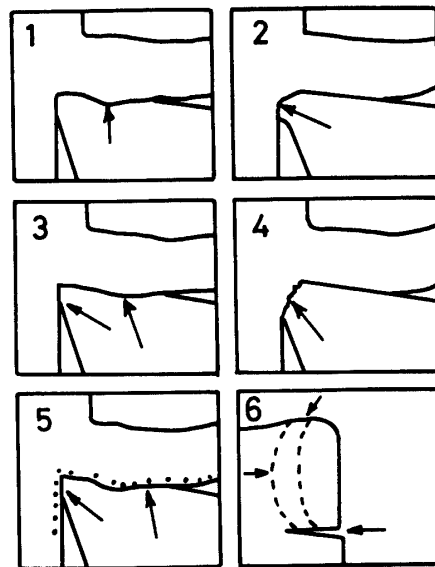


Fig. 1 Wear patterns of high-speed-steel tool used for machining SCM 4 steel at the cutting speed of 40 m/min.

への構成刃先 (Built-Up Edge 以下略して B. U. E. とする) の付着は避けられない。

K. Hoshi と T. Hoshi⁵⁾ は B. U. E. の付着機構を the mechanical inlaying of the deformed metal into the asperities of the tool surface. と述べている。こうして発生した B. U. E. は生成と脱落を繰り返す。この脱落片は工具のすくい面に沿って切りくずとともに流出するものと工具逃げ面側に脱落して工作物に付着するものの2種類である。切削過程で B. U. E. の脱落片は繰り返して工具すくい面と逃げ面に流れてゆく。このため、切削工具の切れ刃稜は B. U. E. の生成そしてその脱落の過程で損傷を受ける。このように高速度鋼工具を用いた切削において B. U. E. の生成と脱落は必ず発生し、避けられない。なお、高速度鋼工具の摩耗機構について E. M. Trent⁶⁾ は Fig. 2 に示す6種類の分類を行なっている。このうち、4に示すアトリション摩耗が切れ刃稜の耐摩耗性と密接に関係している。そこで、この摩耗に特に注目して検討を



1. PLASTIC SHEAR AT HIGH TEMPERATURE
2. DEFORMATION UNDER COMPRESSIVE STRESS
3. DIFFUSION WEAR
4. ATTRITION WEAR
5. ABRASIVE WEAR
6. SLIDING WEAR PROCESSES

Fig. 2 Wear mechanism on high-speed-steel tools (E. M. TRENT⁶⁾)

行なった。

P. K. Wright と E. M. Trent の研究⁷⁾によれば、切削工具の切れ刃稜に生ずる損傷原因について A worn tool surface is most probably formed by the pulling away of fragments of the tool material subjected to localized tensile stresses when the work material is torn off. と述べ、E. M. Trent⁶⁾ はこの摩耗機構をアトリション摩耗と分類している。

これらの研究結果⁵⁾⁶⁾⁷⁾を基にして、炭化物粒子径とオーステナイト結晶粒子径の異なる溶解法の高速度鋼工具と P/M 高速度鋼工具で、それぞれ同一化学成分を有するものの切れ刃稜の摩耗機構は次のように考えられる。

切削加工の進行に伴って不規則形状の B. U. E. が切れ刃稜の上に生成する



B. U. E. は工具すくい面と逃げ面の一部

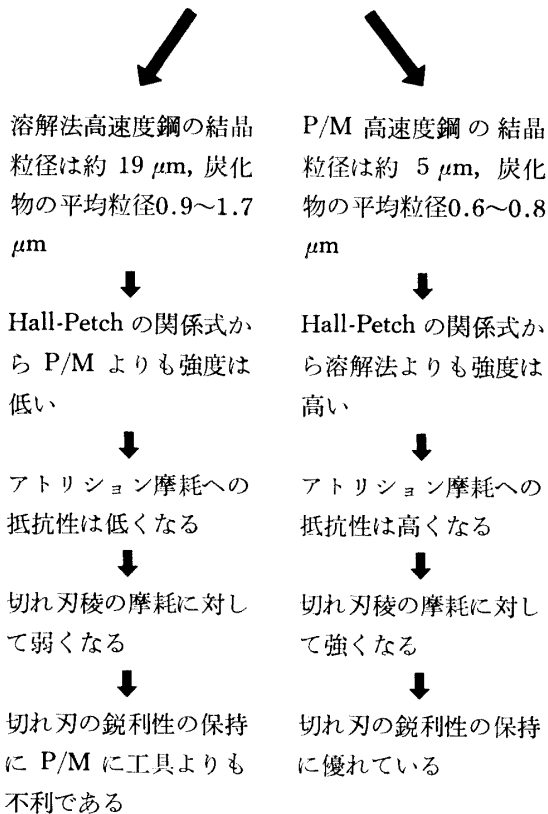
に圧着する



B. U. E. の成長が進むと B. U. E. は一部分だけ分離し、切りくず裏面と工作物表面に脱落・付着する



B. U. E. の脱落に伴って工具粒子に対する局所的な引張応力を発生して、工具の結晶粒界を破壊し、アトリション摩耗が進行する



上記のような摩耗機構から P/M 高速度鋼工具は切

れ刃に生ずるアトリション摩耗に対して強いため、切れ刃の鋭利性の保持に優れていると推察される。

3. 実験に用いた工具と切削条件

前章で述べたように高速度鋼工具のオーステナイト結晶粒径と炭化物粒子径の大小が切れ刃の鋭利性保持にどのような影響を与えるかについて実験的に検討しなければならない。そこで、Table 1 に示すような3水準の化学成分で分類される溶解法と P/M 法の高速

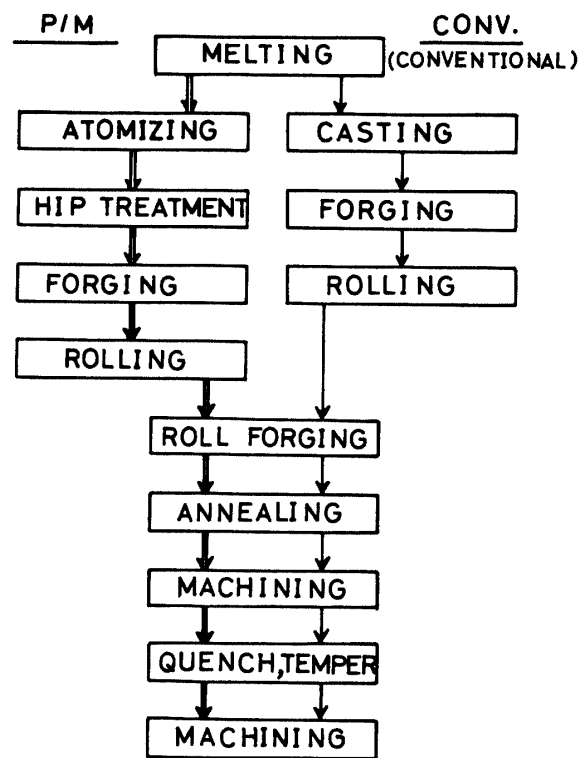


Fig. 3 Manufacturing processes of tested high-speed-steel tools

Table 1. Chemical composition and hardness of tested tools

PROCESS	TOOL	CHEMICAL COMPOSITION (wt %)						HARDNESS ROCKWELL C-SCALE
		C	Cr	Mo	W	V	Co	
CONV.	5M	1.49	4.09	0.24	11.91	4.28	4.57	66.6
P/M	5PM	1.39	4.07	0.26	12.22	4.54	4.67	65.6
CONV.	10M	1.22	3.99	3.73	9.63	3.25	10.07	66.7
P/M	10PM	1.32	4.11	3.63	10.34	3.51	9.96	66.1
CONV.	15M	1.41	3.98	4.63	10.07	3.36	11.82	68.1
P/M	15PM	1.40	4.31	5.37	10.06	3.84	11.99	67.4

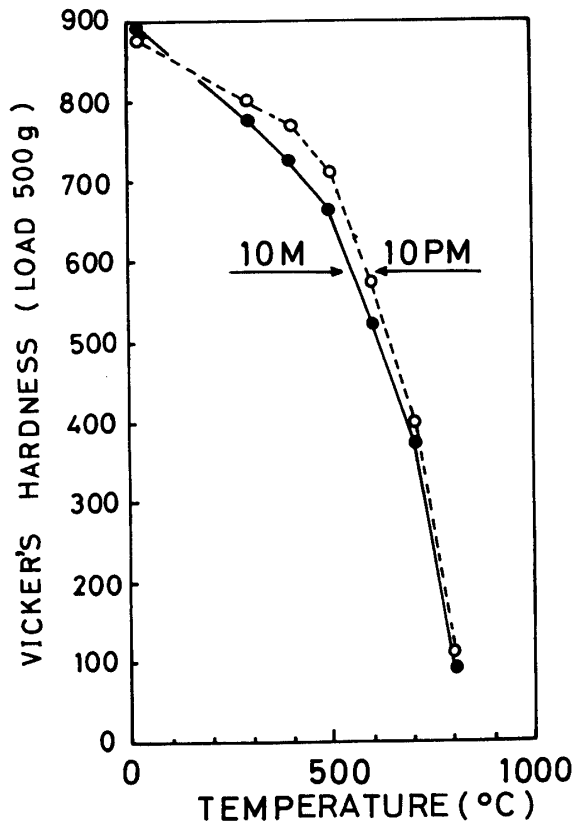


Fig. 4 Relationship between temperature and vicker's hardness

度鋼をそれぞれ試作した。その製造工程は Fig. 3 に示す。

これら工具の熱処理は 1240°C から油焼入れを45秒行なったのち、550°C・1時間の焼戻しを3回実施して硬度と靱性を得よう配慮した。それぞれの常温硬度はロックウェルCスケールで測定し、Table 1 に併記した。高温硬度は 10M, 10PM についてマイクロピッカース硬度計で測定し、その結果を Fig. 4 に示す。この実験から溶解法と P/M 法いずれの高温硬度にもその傾向に大きな差異は生じていない。しかし、300°C 以上で P/M 法のそれは僅かに高い。

この実験に用いた高速度鋼工具6種類の金属組織写真(1000倍)は Fig. 5 に示す。これらの組織写真から炭化物の粒径は P/M 法で 0.6~0.8 μm, 溶解法のそれは 0.9~1.7 μm であるが、後者には粗大炭化物が混在し、その粒径は 4.7~8.5 μm の範囲である。P/M の炭化物は均一に分散しているが、溶解法のそれは不均一である。また、オーステナイト結晶粒は P/M 法で約 5 μm, 溶解法で約 15 μm と P/M 法のそれが小さい。このようにして製造した高速度鋼は 12.7 mm×12.7 mm×厚さ 4.7mm, ノーズ半径 1 mm

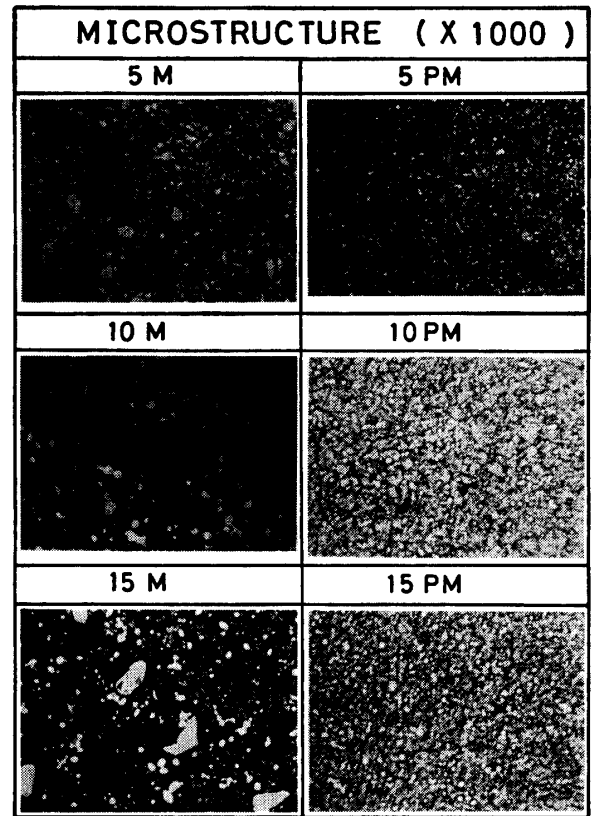


Fig. 5 Microstructures of tested tools

のスローアウェイ型チップに製作した。

工具の切削性能を評価する方法として連続切削と断続切削が考えられる。そこで、連続切削は旋削を、断続切削は正面フライス削りをそれぞれ選定した。旋削実験は横切れ刃角・前切れ刃角ともに 15°, 前すくい角 0°, 横すくい角 15° のホルダーを特別に製作して使用した。

正面フライス削り実験は正面フライスカッター(直径 100 mm)の単一刃を用いた。その工具形状はアキシャルレーキ角+5°, ラジアルレーキ角+5°, コーナー角 15° である。

切削条件は切削速度 40 m/min, 切込み 1.5 mm または 2 mm とし、切れ刃稜への切削合力の着点を変えて、切れ刃稜の損傷を調べるために送りを変化させた。

本実験では原則として切削油剤は使用していないが、一部、正面フライス削りで 2000 cc/min の割合で使用した。なお、切削油剤はユシロ化学(株)の DS50N である。

旋削に用いた被削材はクロモリブデン鋼 (SCM 4 HB=290) であり、正面フライス削りに用いたそれは炭素鋼 (S53C, HB=220) である。いずれの被削材も

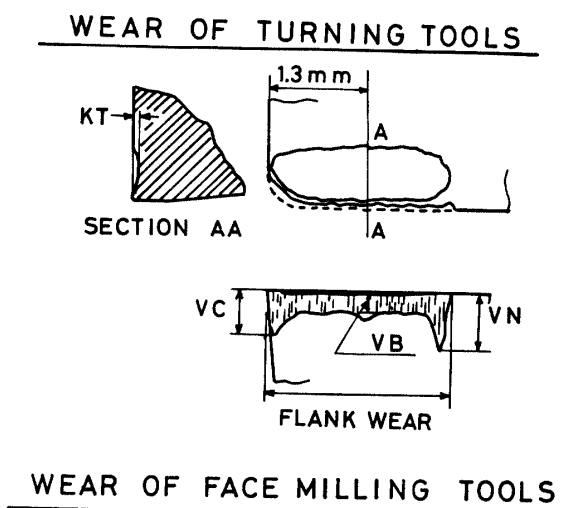


Fig. 6 Some features of tool wear in turning and face milling operations

焼きならし処理を行なって、組織と硬度が均一になるように配慮した。工具摩耗の測定方法は CIRP・GROUP-C “Terminology and Procedures for Turning Research” C. I. R. P. に準じて行なった。これら工具の摩耗測定箇所は Fig. 6 に示す位置である。

4. 実験結果と考察

切削工具の切れ刃に生ずる損傷への影響を調べる切削方式として連続切削と断続切削の二者が考えられる。ここでは前者に旋削、後者に正面フライス削りを用いた。旋削は B. U. E. の生成と脱落を繰返して、切れ刃に連続してアトリション摩耗を発生する。一方、正面フライス削りでは B. U. E. は切りくずとともに脱落し、切りくず生成中には B. U. E. は生成・脱落を行なう。

このように B. U. E. の生成・脱落の様式が異なる。これが工具摩耗機構へ影響すれば、第2章で述べた工具摩耗機構のモデルは一般性を失なう。そこで、本研究では両切削方式によって溶解法と P/M 法それぞれ

の高速鋼工具の切削性能を評価し、切れ刃に生ずる工具摩耗の機構について妥当性を検討した。

溶解法と P/M 法工具それぞれの切削特性を調べるために旋削における切削抵抗を測定した。その切削速度は 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 m/min, 切り込み 2 mm, 送り 0.1 mm/rev とした。切削抵抗 3 分力はデータレコーダに記録のち、本学情報処理センターで A-D 変換し、電算機により切削分力比を求めた。

$$\text{切削分力比} = \frac{\sqrt{(\text{送り分力 } F_2)^2 + (\text{背分力 } F_3)^2}}{\text{主分力 } F_1}$$

この計算結果は切削速度と切削分力比との関係として Fig. 7 に示した。この実験から溶解法と P/M 法

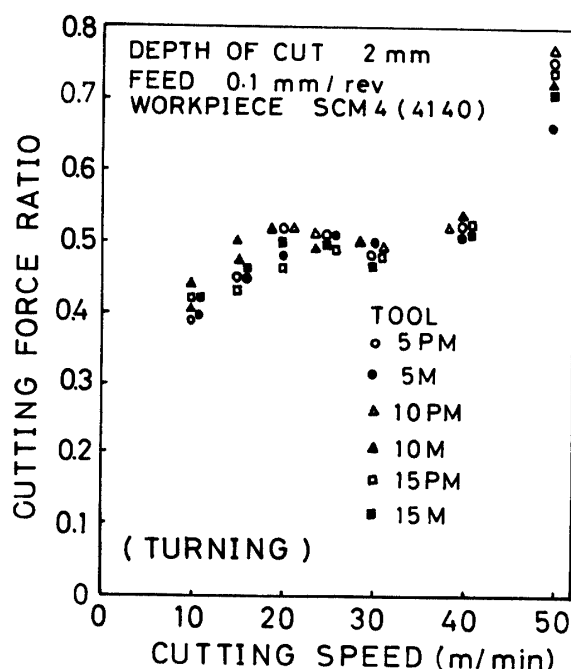


Fig. 7 Relationship between cutting speed and cutting force ratio with tested high-speed-steel tools

いずれの工具とも切削抵抗に差異は認められなかった。このことは両者の切削速度域が B. U. E. の生成・脱落を繰返すノーズ型の安定な B. U. E. 付着領域であり、切削機構に対して工具の製造方法は影響し難いためと考えられる。一方では B. U. E. の生成と脱落の変化状況は工具製造工程の影響も心配される。そこで、切削抵抗の送り分力成分のパワースペクトル分析をすべての切削速度の実験について実施した。この分析から工具製造工程の相違は B. U. E. の生成・脱落状況の変化に影響を及ぼしていないことが分った。このことは Fig. 1 に示す切れ刃の損傷写真から、いずれの場合

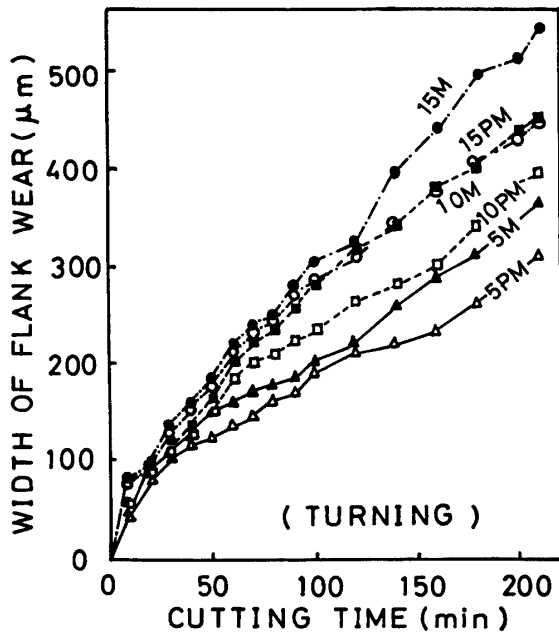


Fig. 8 Wear curves of tested tools in Machining the SCM 4 steel

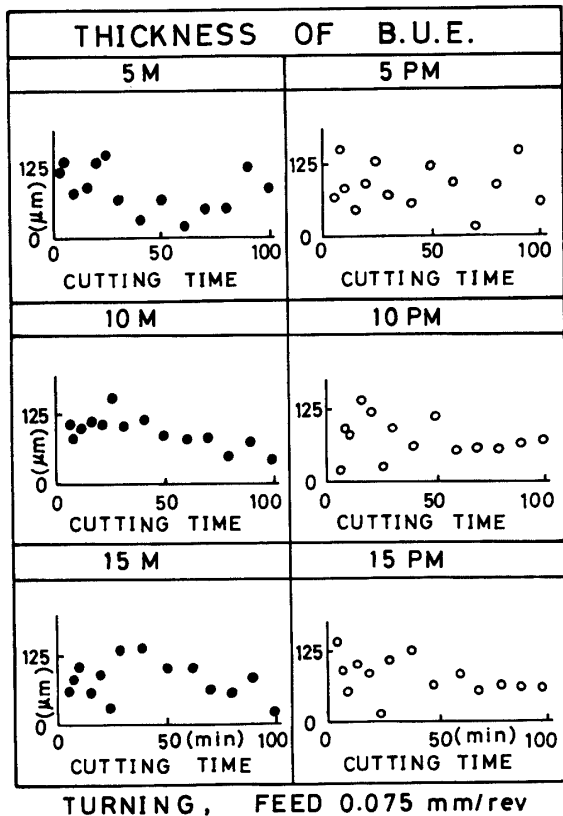


Fig. 9 Relationship between thickness of built-up-edge and cutting time in machining the SCM 4 steel

合も B. U. E. を伴っていることが認められる。
次に旋削によって各工具の寿命試験を行なった。切
Vol. 35 No. 1 (1984)

削速度 10, 20, 40 m/min, 切込み 2 mm, 送り 0.075 mm/rev の実験結果を示す。切削速度 10, 20 m/min の時, 切削時間100分で逃げ面摩耗幅 VB=50 μm 以下であり, 製造方法の差異は工具摩耗の違いとなって現われていない。しかし, 切削速度 40 m/min で旋削したところ, いずれの工具も P/M 法が溶解法よりも小さい VB の値を示した。Fig. 8 はこれらの実験結果を示した切削時間と VB との関係である。また, この実験と平行して各切削時間毎に B. U. E. の高さを測定した。切削時間と B. U. E. の高さとの関係は Fig. 9 に示す。B. U. E. の高さは Fig. 9 に示したように前切れ刃側より 1.3 mm の位置で横切れ切に垂直方向に表面あらさ計の触針で断面曲線を求めて実測した。

この実験から切削時間の経過とともにクレータ摩耗が進行し, 見かけのすくい角は大きくなる。このため B. U. E. の高さは切削時間の経過とともに低くなる傾向を示している。しかし, 切れ刃への B. U. E. 付着に関して溶解法と P/M 法との間には大きな相違は見られない。このことは第 2 章で述べた工具摩耗機構における B. U. E. の付着と良く一致している。

そこで, 切れ刃稜の摩耗状態を調べるため, 走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope 以下

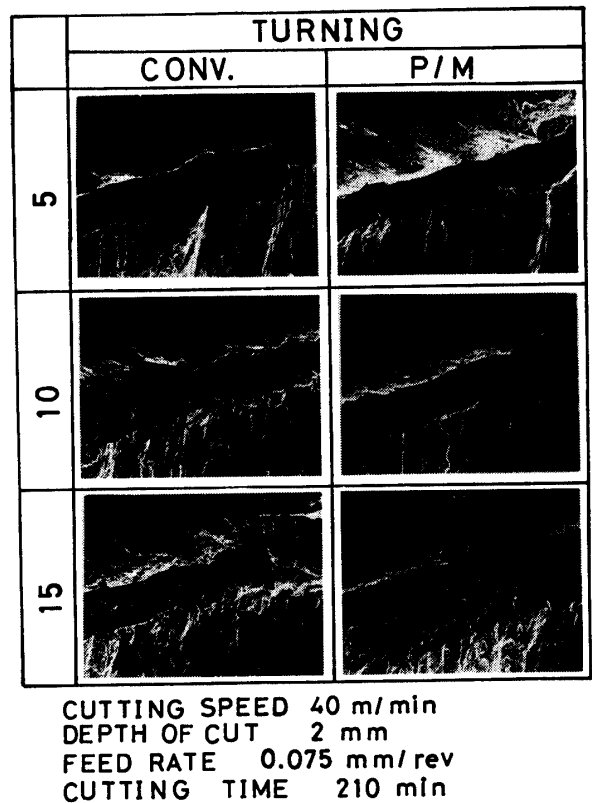


Fig. 10 SEM photograpaphs after turning operation

SEM と略す) で詳細な工具傷観察を行なった. Fig. 10は切削時間210分における SEM 写真である. 前述の Fig. 9 に示したように, いずれの工具も B. U. E. が付着していて, 切れ刃稜の損傷状態を直接観察出来ない. そこで, 切削実験終了後に工具と同一の切削条件で黄銅を30秒切削して B. U. E. を除去し, SEM 写真を撮影した.

Fig. 10 から P/M 法の切れ刃稜の損傷は溶解法のそれと比較して小さいことが SEM 写真より認められる. これらの実験結果から旋削において P/M 法の工具はアトリジョン摩耗に対して強いことが認められた.

次に, 正面フライス削りにおける切れ刃稜の工具損傷はどのように進行するかについて, 炭素鋼 S53C を切削して実験を行なった.

K. Hoshi と T. Hoshi⁹⁾ が述べているように, 切削工具の急な離脱で B. U. E. は切りくず側に付着し, 切削工具の切れ刃稜側に残らない. 正面フライス削りでは同様な現象の発生を良く経験する. このように B. U. E. の付着状況の異なる切削方式で溶解法と P/M 法の工具摩耗はどのような挙動を示すか検討した. 切削条件は切削速度 42 m/min, 切り込み 1.5 mm, 送り 0.05, 0.075, 0.1, 0.2 mm/rev である. 被削材の中心線とフライスカッターの中心が合うようにし, 喰い付き角+35°, 離脱角-35°となるようにした. この切削条件により, 各工具について切削時間と VB, KT との関係をそれぞれ求めた. 正面フライス削りの切削

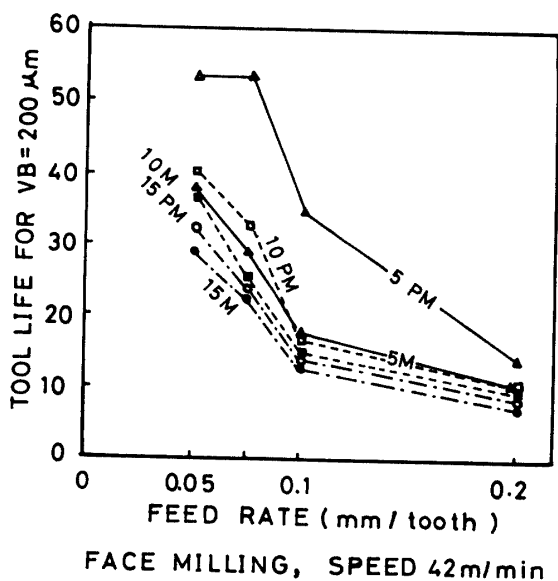


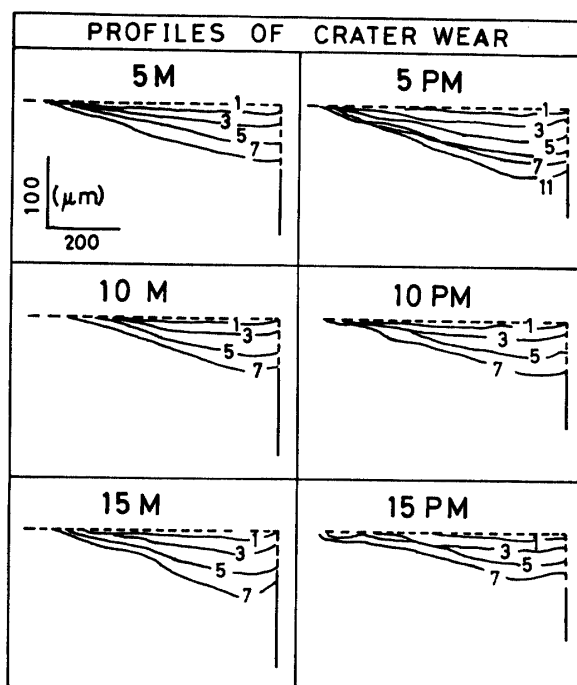
Fig. 11 Relation between tool life and feed in face milling with tested tools (Tool life criterion VB=200 μm)

時間は実切削時間と空切削時間を合わせたものになる. しかし, この実験における結果の整理には実切削時間を算出して用いた.

Fig. 11 は工具の寿命基準を VB=200 μm とした時に求めた送りの変化と工具寿命時間 (実切削時間) との関係である. 5 PM は 5 M と比較して著しい性能向上が見られる. また, 10 PM, 15 PM とともに溶解法の 10 M, 15 M と比較して逃げ面摩耗の進行は遅い.

このことは第 2 章で述べた工具摩耗機構より P/M 法の工具では強固な堤防を持ち, 切れ刃稜の摩耗の進行を防いでいる. このため, VB 摩耗の進行は P/M 法の工具において有利であることが分った.

Fig. 12 はクレータ断面を前切れ刃側より 1.9 mm



FACE MILLING, FEED 0.1 mm/tooth

Fig. 12 Relation between profiles of crater wear and cutting volume in face milling with tested tools.

の位置で表面あらさ計によって測定した結果である. この図から P/M 法の工具は切れ刃稜に堤防を持っている. しかし, 溶解法工具では切れ刃稜に堤防の存在を認めない. しかも, この工具では堤防のないことによりすくい面摩耗側から逃げ面摩耗側へ連続的に続き, 切れ刃稜がだれてしまっていることが認められる. これは切れ刃稜の強度不足で, 切削開始時と終了時の衝撃によって, 堤防部分が僅かずつ脱落したものである. このように断続切削で工具の切れ刃稜に強度

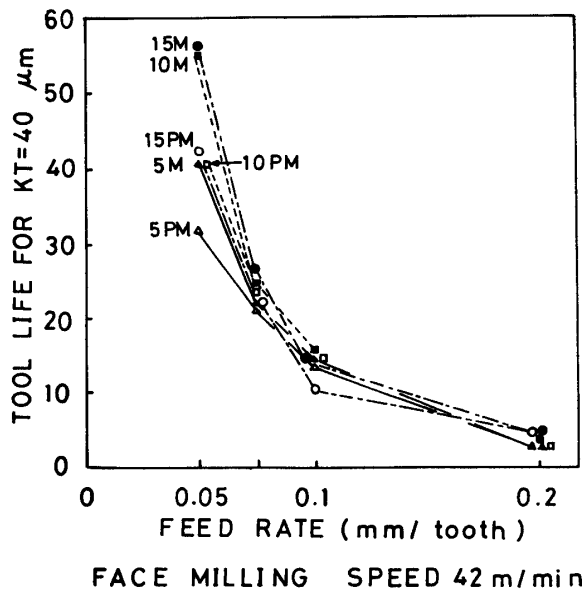


Fig. 13 Relation between tool life and in face milling with tested tools (Tool life criterion $KT=40 \mu m$)

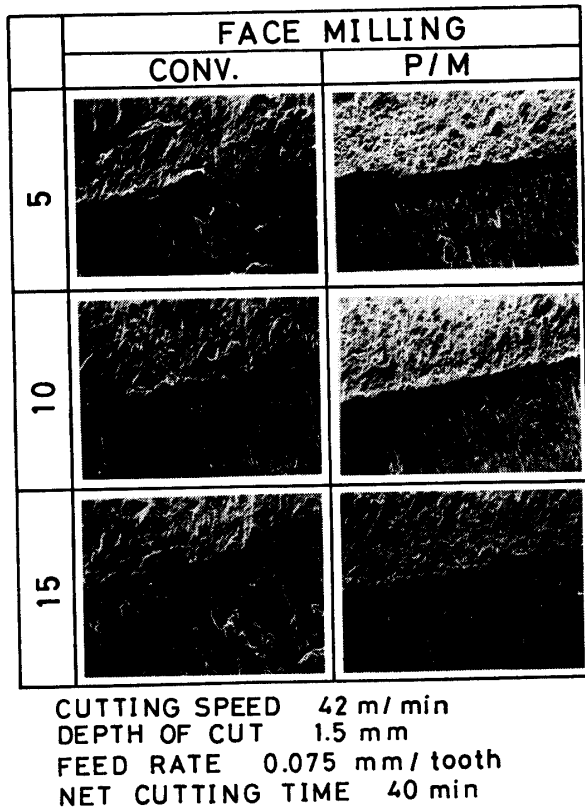


Fig. 14 SEM photographs after dry face milling operation

が要求される場合には、P/M 法工具は溶解法工具よりも有利である。

Fig. 13 は Fig. 11 の実験と同時に KT 摩耗を測定

し、寿命基準 $KT=40 \mu m$ で求めた送りと工具寿命時間(実切削時間)との関係である。この実験から P/M 法と溶解法それぞれの工具に生ずるクレータ摩耗は溶解法のそれに有利なことが認められる。この相違は僅かである。

これは正面フライス削りにおける工具のクレータ摩耗に対して、溶解法の炭化物粒子径が P/M のそれよりも大きく、耐摩耗性を良くする方向に作用したものと推察される。

Fig. 14 は正面フライス削りにおける工具摩耗の生成状態を SEM 写真にて観察を行なった結果である。これらの SEM 写真からも溶解法の切れ刃稜は P/M 法のそれと比較して損傷を受けていることが認められる。同様な実験を不水溶性油剤(2000 cc/min, ユシロ化学製 DS50N)を用いて正面フライス削りを行なったところ、前述の乾式切削の場合よりもそれぞれの切れ刃稜の工具摩耗の進行に対して、工具の製造方法は大きく影響することが認められた。Fig. 15 は湿式正面フライス削りにおける工具損傷の SEM 写真であり、この図より P/M 法の工具は切れ刃稜の損傷に強いことが分った。

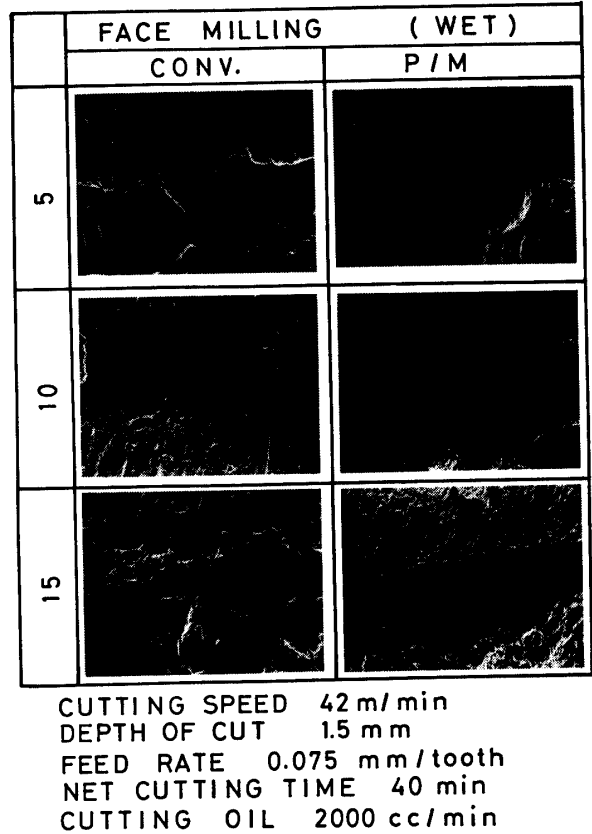


Fig. 15 SEM photographs after wet face milling operation

このように E. M. Trent⁶⁾ が述べている高速度鋼工具の摩耗機構6分類のうち、高速度鋼工具に要求される切れ刃の鋭利性保持とアトリジョン摩耗との関係について検討した。

その結果、連続切削、断続切削ともに第2章で述べた摩耗機構が適用出来た。そして、溶解法の工具よりも P/M 法のそれが切れ刃稜の鋭利性を持続させるうえで有利であることが分った。

5. 結 言

高速度鋼工具は切れ刃の鋭利性と靱性を特に要求される切削加工の分野で数多く使用されている。この切れ刃鋭利性保持の立場から溶解法工具と P/M 法工具の切削性能について検討した。このため、まず切れ刃稜の鋭利性を保持するに当って両工具の摩耗機構を検討し、さらに切削実験を通じてモデルの確認を行なった。そして次の結言を得た。

(1) 高速度鋼工具を用いて鋼を切削する時、常用される切削速度域では必ず B. U. E. が生成・脱落を繰返す。この B. U. E. 片が流出するに際し、工具粒子を持ち去りアトリジョン摩耗を発生させる。工具のオーステナイト結晶粒度と炭化物粒子径の小さいものほど Hall-Petch の関係から、強度は強くなり、これら結晶や炭化物の微細な工具ほどアトリジョン摩耗への抵抗性は大となる。これに関して摩耗機構のモデルを示した。

(2) P/M 法工具は溶解法工具の結晶粒度よりも小さく、連続切削、断続切削いずれの切削方式でも切れ刃稜の鋭利性の保持が良く、切れ刃稜の摩耗機構モデルと切削実験の結果との間に良い一致が得られた。

参 考 文 献

- 1) 山川哲央：粉末ハイスの現状，精密機械 46, 5, 529～534 (1980)
- 2) 萬戸博宗，本間克彦，滝川 博，藤本弘文，石井 勝：粉末高速度鋼の製造方法，神戸製鋼所工具技報 26, 2～8 (1979)
- 3) 辻 克己，河合伸泰，平野 稔，立野常男：粉末高速度鋼の諸特性，神戸製鋼所工具技報 26, 9～13 (1979)
- 4) G. E. DIETER: Mechanical Metallurgy KO-GAKUSHA-Mc GRAW HILL (1976) p. 197
- 5) K. HOSHI and T. HOSHI: On the Metal Cutting mechanism with the Built-Up-Edge, Proceedings of the 9th International M. T. D. R. Conference, (Sept. 1963) p. 1099～1111
- 6) E. M. TRENT: Metal Cutting, BUTTERWORTHS, (1977) p. 91～93
- 7) P. K. WRIGHT and E. M. TRENT: Metallurgical appraisal of wear mechanisms and processes on high-speed-steel cutting tools, Metals Technology (JAN. 1974) p. 13～23
(昭和59年3月13日 受理)