

ステンレス鋼切削に関する研究 (第1報)*

—旋削における適合材種の選定—

大 草 喜太雄**・山 本 英 司**

Study on Machining of Stainless Steel (1st report)

—Selection of Suitable Tool Material for Turning—

Kitao ŌKUSA and Eiji YAMAMOTO

Abstract

Many stainless steels are used for the thermal resisting materials and the parts of chemical equipment. The poor machinability of 18—8 stainless steel is due to the occurrence of the remarkable welds and work hardening property in machining. The suitable tool material for lathe turning 18—8 stainless steel is selected by the observation of tool failures among the sintered carbides (JIS, K20, M20, P20), high speed steel (SKH4) and oxide ceramic tool.

1. The suitable tool materials are M20 and P20 which contain a considerable amount of TiC and TaC.
2. Remarkable boundary flank wear (V_B'') appears in the machining of this workpiece. The amount of V_B'' in case of positive rake face is less than in that of negative rake face.
3. Generation of V_B'' may show that the deformation of chips at the boundary of the main cutting edge is severer than at any other place in cutting edge.

1. 緒 言

ステンレス鋼は耐熱、耐食性にすぐれているので、耐熱材、化学工業用装置などに多く使用されている。しかしこの材料はかたさは低いが、加工硬化が著しいと同時に溶着し易い材質であるため、切削作業はなかなか困難で、適合工具材種の選定や適切な切削条件のきめ方など現在でも多くの問題が残っている。被削材としてはステンレス鋼のうちでも比較的難削材である SUS27 (18—8 オーステナイト系ステンレス鋼) を用いた。その特性は Table 1 のごとくで炭素鋼に比べると熱伝導率が著しく劣る。

工具材料は広い範囲より選択する必要があるので、超硬工具のうちでも比較的多く使用されている鋼用 P20、汎用 M 20、鋳鉄用 K 20 の3種類の材種と、超硬合金より耐熱性には劣るが靱性にとむ高速度鋼 (SKH 4) および靱性には劣るが、耐熱、耐摩耗性にすぐれたセラミックスの5種類を用いて、先ず円筒形

状の連続旋削を行った。

そしてその時の工具損傷を観察することにより、上記の工具材種より適合したものを選んだ。また削り速度をかえた時の切削力、切削温度も測定し、これらと工具寿命の関係についても述べる。

2. 実験方法

使用した機械は精密汎用旋盤 (コップ無段変速機付、スイング 250mm, 心間距離 1350mm, 主電動機 7.6KW, 西部電機製) で、被削材 (200φ×1000) はチャックとセンターで支持した。被削材 (SUS27) の組織およびかたさを Fig.1 に示すが、そのかたさは $H_V=142$ で軟質である。またその特性は Table 1 に示すごとく、ステンレス鋼は炭素鋼より熱伝導率や $\lambda \cdot r \cdot c$ の値が小さい。

使用した工具の材種、成分、かたさ、形状などは Table 2 に示す。工具の最終研磨は SKH 4 を WA 砥石で、超硬工具 (ウィディア社製) はダイヤモンド砥

* 昭和42年6月30日 日本機械学会中国四国支部宇部地方講演会にて講演

** 生産機械工学教室

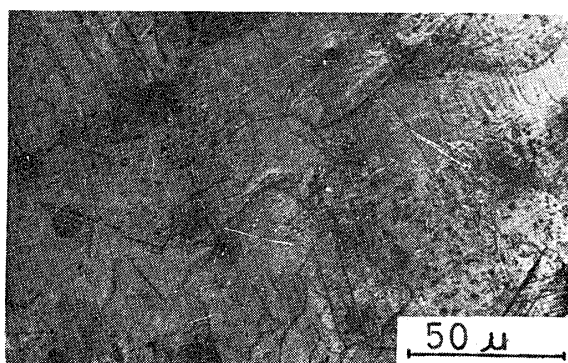


Fig.1 Micrograph of structure (SUS27)

Hardness $H_v(30kg) = 142$

石で行った。

切削条件は削り速度 $V=20\sim 200\text{m/min}$, 切込み $d=1.5\text{mm}$, 送り $f=0.2\text{mm/rev}$ で削り速度を変化させた。

切削力は工具動力計 (KSA-500型) にて3分力を

同時に測定し, 切削温度は工具-被削材直接熱電対法によった。この時の切削時間は5~20秒間の短時間切削である。

工具損傷量の測定は, フランク摩耗 (平均摩耗幅 V_B , ノーズ摩耗幅 V_B' , 境界摩耗幅 V_B'') と, クレータ摩耗の深さ (K_T) の両方を測定するのが普通であるが, 切くずが溶着し易いため, すくい面に溶着物が盛上っていて, K_T の測定が困難なときには, 工具損傷量の比較には主としてフランク摩耗を用いた。

削り速度 (V) が高速 ($V=70, 100, 200\text{m/min}$) になると, K_T も無視できないので, 切削終了後塩酸 (HCl) にて溶着物を溶かし, ユニオン工具顕微鏡で K_T の測定をした。溶着物のフランク摩耗におよぼす影響は少ないので, 溶着物を取り除かずこれを測定した。

Table 1 Properties of workpiece¹⁾

Property	Specific gravity	Tensile strength	Thermal conductivity	Specific heat	
Symbol and dimension	γ g/cm ³	σ_B kg/mm ²	λ cal/cm·sec·°C	c cal/g·°C	$\lambda \cdot \gamma \cdot c$ cal ² /cm ⁴ ·S·°C ²
SAE1020 (JIS.S20C)	7.75	42	1340	0.13	1360
18-8 (JIS.SUS27)	7.75	60	395	0.12	372

Table 2 Properties and types of various tool

Tool material	High speed steel	Sintered carbide *			Ceramics **
	SKH 4	P20	M20	K20	
Composition %	65Fe, 0.79C, 4.20Cr, 18.00W, 10.00Co, 1.25V	76WC, 10Co, 14(TiC+TaC)	82WC, 8Co, 10(TiC+TaC)	92WC, 6Co, 2(TiC+TaC)	Al ₂ O ₃
Hardness	$H_{RC}=66.0$	$H_V=1500$	$H_V=1550$	$H_V=1550$	$H_{RA}=94$
Bending strength σ_b kg/mm ²	300~400	150	165	170	50~70
Tool type	19□mm solid tool type JIS 31-3	Tipped tool type JIS 31-3			Throw away tool type JIS 31-4
Tool geometry	(0°, 6°, 6°, 6°, 15°, 15°, 0.7R)				(-5°, -7°, 5°, 7°, 15°, 15°, 0.8R)

* From catalogue of WIDIA Co.

**From catalogue of TOSHIBA TUNGALOY Co.

3. 実験結果とその考察

まず各削り速度での短時間切削試験つまり工具損傷が無視できる範囲での切削力, 切削温度を求め, その結果を Fig. 2 に示す. この図には比較用にS15C ($H_V=126$) の値もプロットしたがSUS27 では切削力と相反して切削温度が高い.

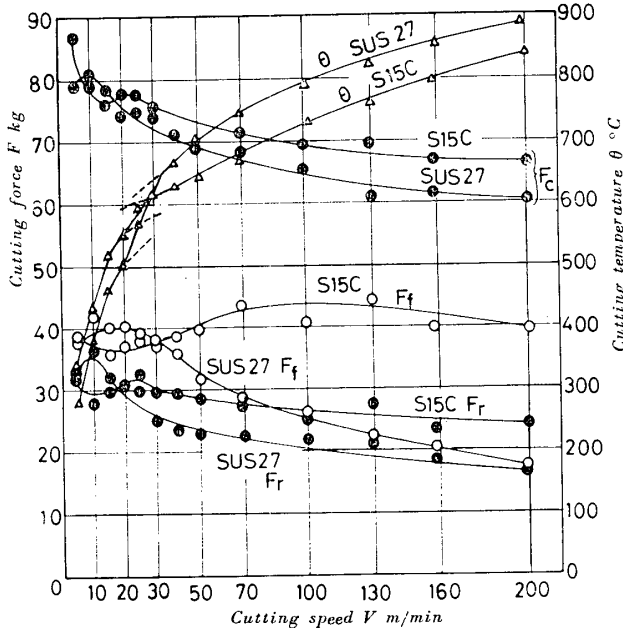


Fig.2 Cutting force and cutting temperature in each cutting speed.

$V \times d \times f = 5 \sim 200 \text{ m/min} \times 1.5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm/rev}$
 Tool, P20 ($0^\circ, 6^\circ, 6^\circ, 6^\circ, 15^\circ, 15^\circ, 0.5R$) 8口 solid tool.

F_c , Tangential force on tool. F_f , Feed force on tool. F_r , Normal force on tool.

Fig. 2 より削り速度が増大すると3分力とも減少するが, 切削温度はかなり増大する. 従って種々の削り速度で工具寿命試験を行うことは, 主として切削温度の異なる条件下で実験することであるが, この場合には削り速度 $V=50 \text{ m/min}$ までかなりの溶着物が工具に付着していた. しかしこの溶着物はいわゆる構成刃先といわれるほどの鋭い形状とは認められず, $V-F$ 図でみても $V > 20 \text{ m/min}$ では明瞭な山がないことから, その脱落による機械的摩耗は少なく, かなり強固に工具に溶着しているものと思われる.

Fig. 3 に超硬工具と SKH 4 にて切削した時の, 削り速度とフランク摩耗の関係を示す. また Fig. 4 に削り速度 $V=20 \text{ m/min}$ で切削時間 $T=20 \text{ min}$ を経過した時の工具損傷の写真を示す.

超硬工具ではどの材種でも溶着物が多くフランク摩

耗は少なく, $V=100 \text{ m/min}$ 程度までは同一時間削っても削り速度の影響は少い. 溶着物が摩耗の進行を防止するためである. しかし SKH 4 では $\theta=500^\circ\text{C}$ と切削温度が比較的低く, 溶着物の付着し易い $V=20 \text{ m/min}$ でさえも超硬工具に比べ高速度鋼工具の溶着物は少なく, V_B は超硬工具のそれより遙かに大きい. そして高速度鋼工具では削り速度の増大と共にフランク摩耗は増大し, $V=50 \text{ m/min}$ ($\theta=700^\circ\text{C}$) になると熱摩耗により, 工具寿命は著しく低下し, それ以上の削り速度では切削不可能となる. Fig. 4 にて後方に高い溶着物が形成されているのは境界部の方が温度が低いためであろう.

低速においても超硬工具が高速度鋼工具よりすぐれているのは, 本実験は連続旋削でフライス削りにおけるときの衝撃力が作用せず, 溶着物が発生しても衝撃による分離損傷など起さず, 超硬工具の損傷も高速度鋼工具のそれと同じく短形型の損傷となり, 欠けが発生しないためである. そのため靱性には劣っても, 耐熱耐摩耗性にすぐれた超硬工具の方がすぐれた結果が得られたものである.

超硬工具のうちで鋳鉄用のK20と鋼用, 汎用のP20, M20を比較すると低速におけるフランク摩耗 V_B は大差ないが, $K20 > M20 > P20$ の順に小さくなり, 溶着物の付着し易い削り速度範囲 ($V=20 \sim 50 \text{ m/min}$) では, かたさは高くても, Fig. 4 の写真よりわかるごとく, 溶着物の付着し易い K20 のフランク摩耗が大きい. これは切削中に脱落する溶着物により, 工具がこすり取られるためである.

しかしこの損傷状況からみるとどの材種もクレータ

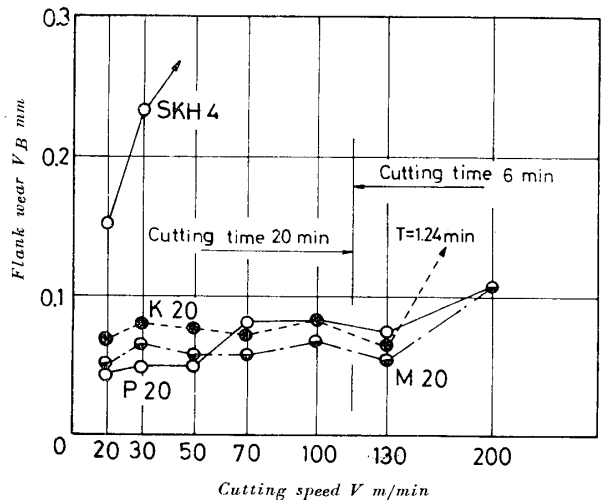


Fig.3 Relation between flank wear and cutting speed.

$V \times d \times f = 20 \sim 200 \text{ m/min} \times 1.5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm/rev}$.

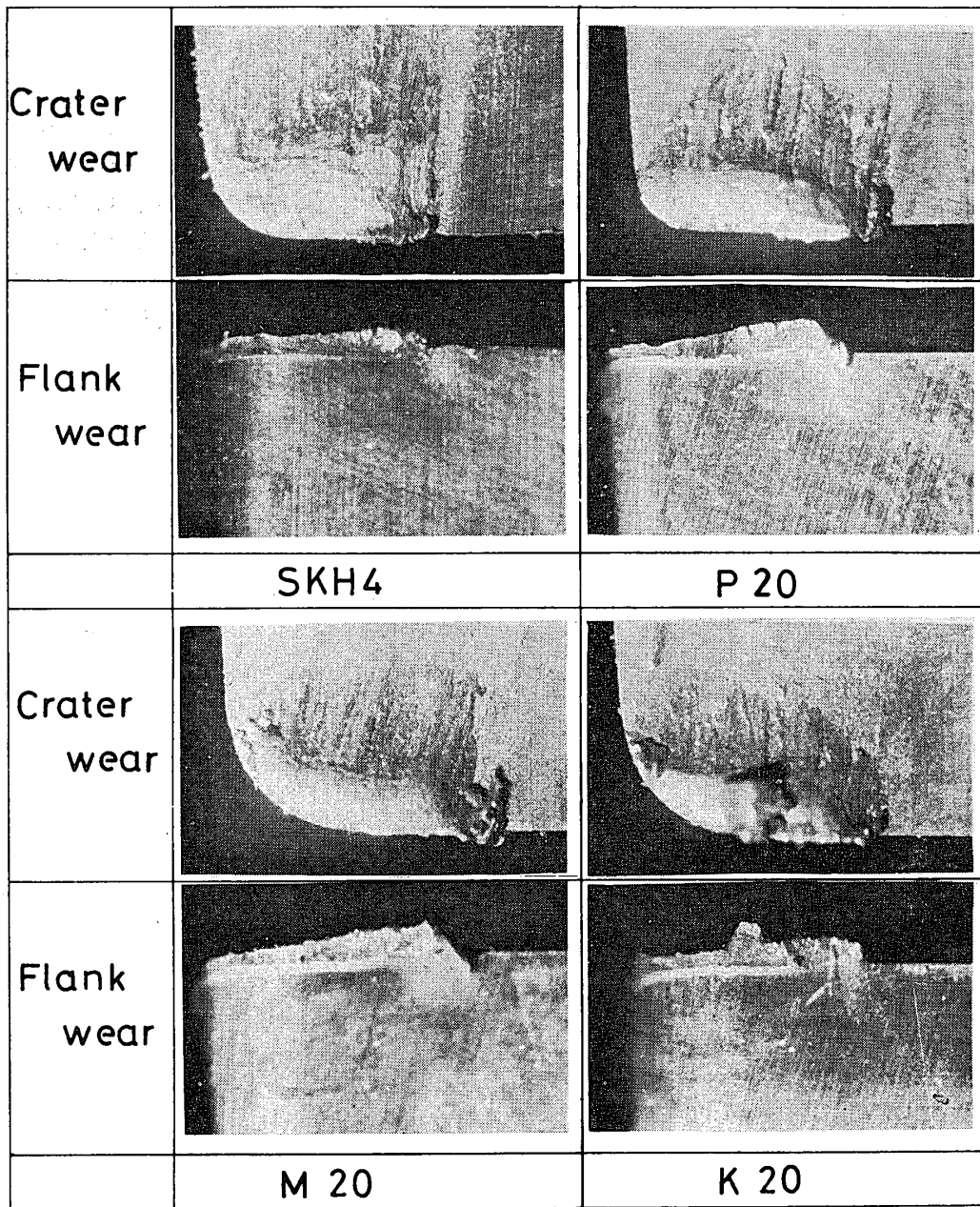


Fig.4 Photographs of tool wear

$V \times d \times f = 20\text{m/min} \times 1.5\text{mm} \times 0.2\text{mm/rev}$, Cutting time $T = 20\text{min}$

摩耗はほとんど発生せず、フランク摩耗も僅かであるので可成りの長寿命時間が推定される。

削り速度 $V = 70 \sim 130\text{m/min}$ 、切削温度 $\theta = 750 \sim 850^\circ\text{C}$ になると、Fig. 5 に示すごとく溶着物は激減し、前述の速度範囲と同じく、フランク摩耗は短形型で V_B' は認められないが、若干の V_B'' が発生しているし高温のためフランク面に可成り広い変色層を認める。このような条件下では超硬工具の材質間の差をはっきりとは認めたいが、いずれの削り速度でも M20 の V_B が若干小さく良い結果が得られた。P20 と K 20 では境界摩耗に若干差を認める。

削り速度 $V = 200\text{m/min}$ では切削温度が $\theta = 900^\circ\text{C}$ と高温になるため、いずれの工具でも V_B は低速より大きくなる。特に K20 では Fig. 6 に示すごとくクレータ摩耗が著しく、わずか $T = 1.24\text{min}$ で堤防破損が生じ、完全摩耗に至っている。一方、P20、M20 では $T = 6\text{min}$ の切削にてもすくい面には幅の広い堤防が存在すると同時にフランク摩耗も $V_B = 0.11\text{mm}$ で、まだまだ切削は可能である。工具損傷の形態はこの場合も短形型であるが、やはり若干の V_B'' の発生が認められた。

Fig. 7 に削り速度とクレータ摩耗 K_T との関係を示

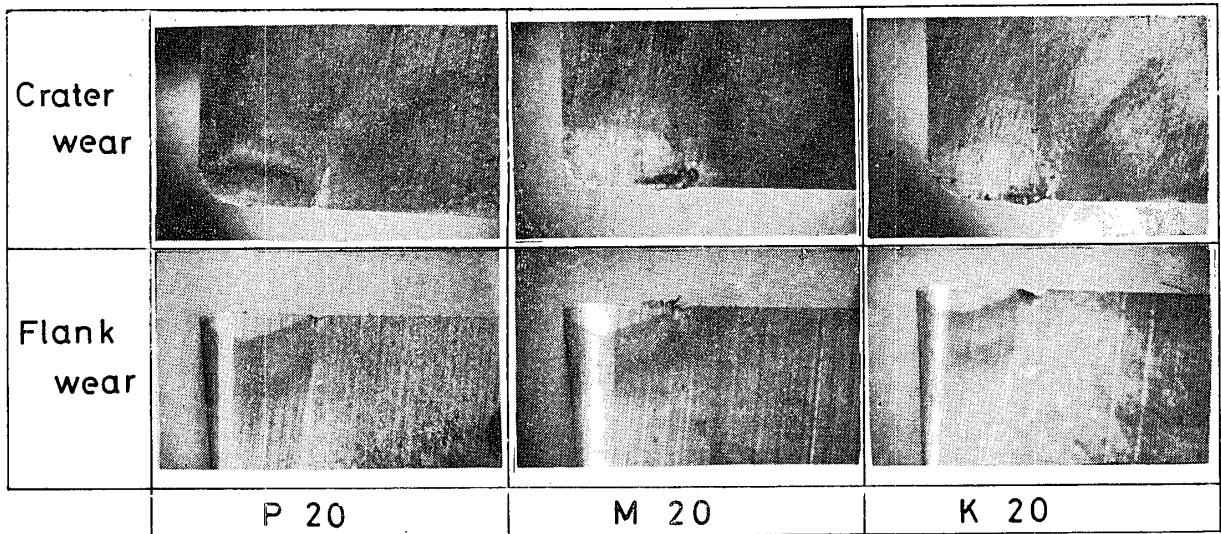


Fig.5 Photographs of tool wear
 $V \times d \times f = 70\text{m/min} \times 1.5\text{mm} \times 0.2\text{mm/rev}$, Cutting time $T = 20\text{min}$

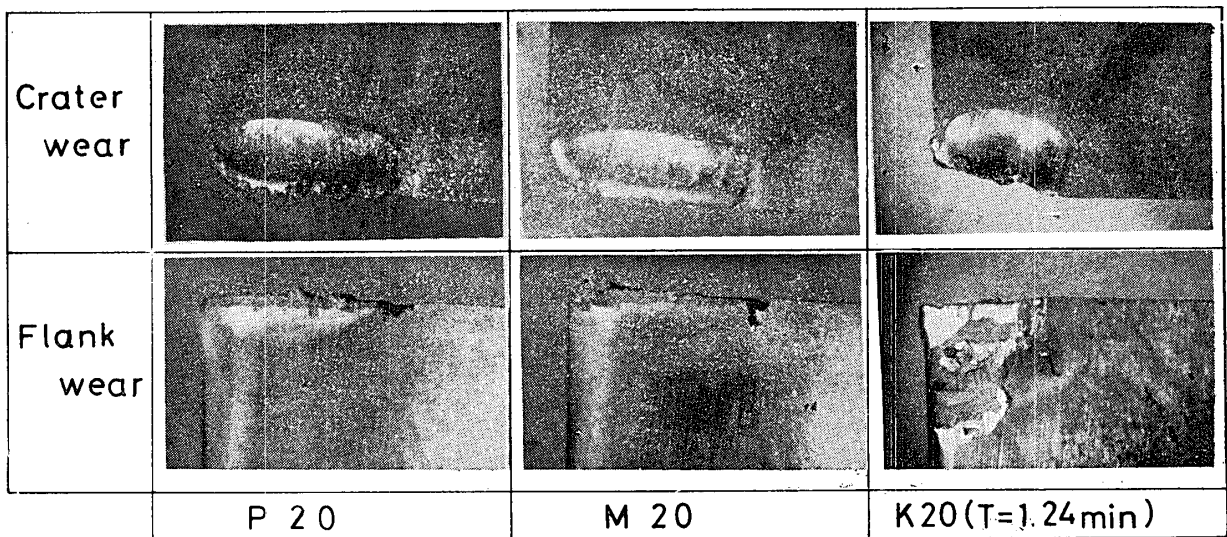


Fig.6 Photographs of tool wear
 $V \times d \times f = 200\text{m/min} \times 1.5\text{mm} \times 0.2\text{mm/rev}$, Cutting time $T = 6, 1.24\text{min}$

すが、 K_T はいずれの工具材種でも削り速度の増大とともに大きくなる。超硬工具の3種類のうちではいずれの削り速度にても K_T で常に K_T が大きく、P20, M20の $\text{TiC}+\text{TaC}$ の多いものほど耐クレータ性が優れている。 $V=200\text{m/min}$ で K20のみ破損したのは Fig. 7 の K_T が大きいこととも一致する。

以上の実験結果より、いずれの削り速度においても工具損傷の形態は若干の V_B'' を伴った短形型であるが、削り速度が異ると、溶着物が著しく付着し易くなったり、クレータ摩耗が著しくなったりして、その速度域での損傷形態は異なる。P20とM20では大差はないが、全体的にみると、全速度域でM20が比較的良好な結

果を示した。

超硬工具より靱性は劣るが耐熱、耐摩耗性にすぐれるセラミックス (スローアウェイ型) を用いて切削した結果を Fig. 8 に示す。この結果を超硬工具の実験結果と比較すると、この場合も工具の損傷形態は V_B'' を伴った短形型で、 V_B の値は超硬工具のそれとほとんど差がない。しかし靱性の劣るセラミックスでは V_B'' が非常に大きくなっている。

そこでセラミックスの損傷状態を顕微鏡で観察すると、Fig. 9 に示すごとく、 V_B の損傷の主原因は超硬工具と同じく摩耗であるが、 V_B'' の損傷の主原因は小さな欠けの集合であることがわかった。従って耐摩

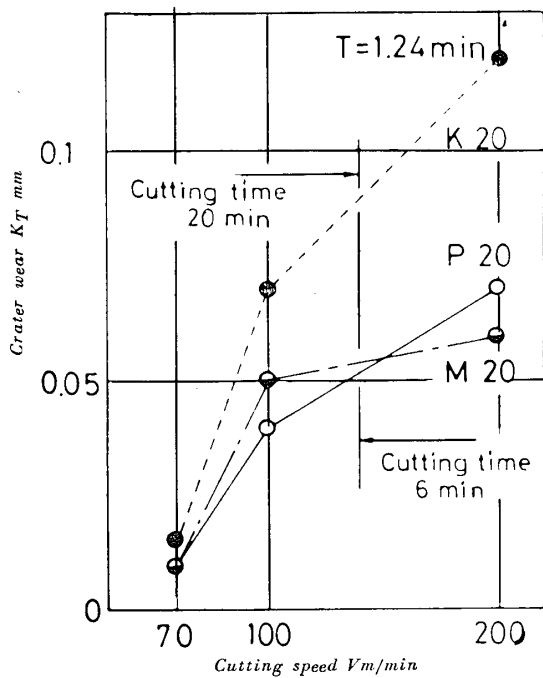


Fig. 7 Relation between crater wear and cutting speed
 $V \times d \times f = 70 \sim 200 \text{ m/min} \times 1.5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm/rev}$

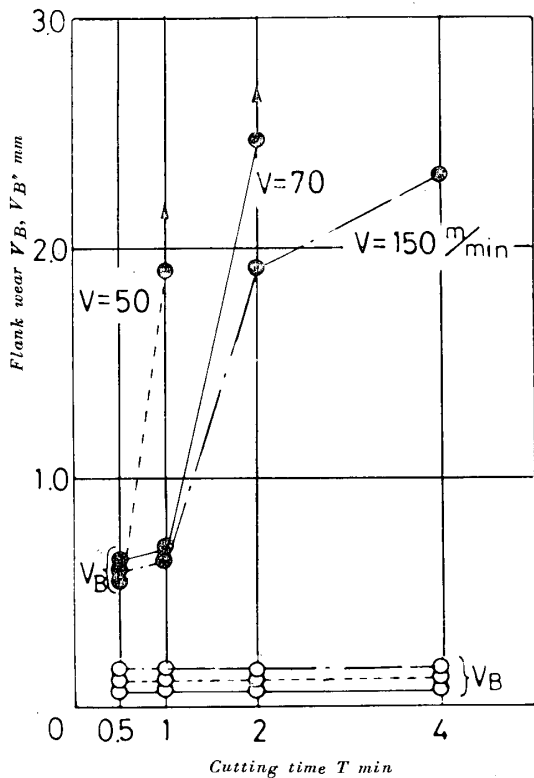
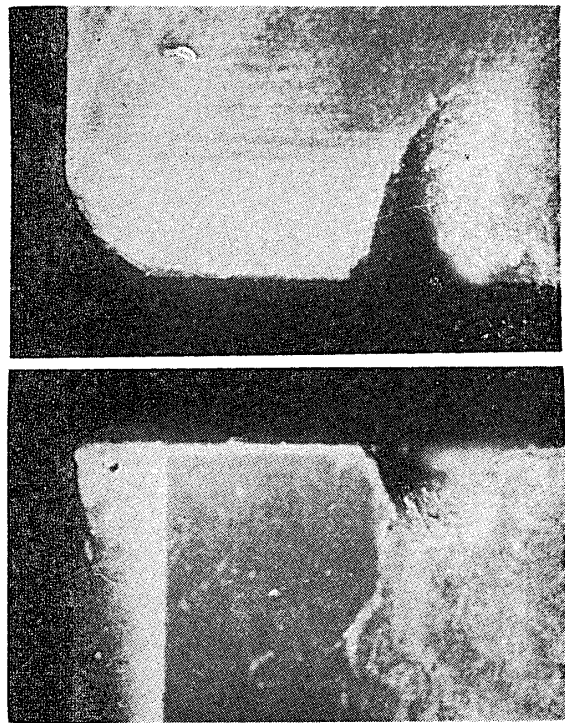


Fig. 8 Relation between flank wear and cutting time
 $V \times d \times f = 50 \sim 150 \text{ m/min} \times 1.5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm/rev}$
 Tool ceramics



Ceramics

Fig. 9 Photographs of tool wear
 $V \times d \times f = 150 \text{ m/min} \times 1.5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm/rev}$,
 Cutting time 2 min.

耗性はすぐれていても靱性に乏しいこの工具は適合しない。耐摩耗性にすぐれているセラミックスでは K_T はほとんど生じていない。

ここで、セラミックスの場合にはスローアウェイ型の工具を用いたため、すくい角が負となり刃部の形状が異なるので、超硬工具との性能の差は、形状の差によるものとも考えられる。

そこでP10のスローアウェイのチップを使用して、セラミックスと全く等しい実験をし、その結果をFig. 10に示した。Fig. 10とFig. 8を比較すると、セラミックスでは V_B'' が速度の増大に伴って減少するが、超硬工具では増大し、削り速度と V_B'' の傾向は逆であるが、いずれの速度にても V_B'' はセラミックスの方が遙かに大きい。

またFig. 10とFig. 3を比較すると、 V_B はすくい角によってあまり変わらないが、 V_B'' はすくい角が正の時には $T=20 \text{ min}$ ないし $T=6 \text{ min}$ にても $V_B'' \doteq 0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$ であるのに、それが負の時にはわずかに $T=4 \text{ min}$ で $V_B'' \doteq 0.15 \sim 0.6 \text{ mm}$ になり、すくい角は正の方が良いことがわかる。

以上を総合すると、SUS27の旋削における適合材種は超硬工具のうちでもTiC、TaCを多く含んだP20、

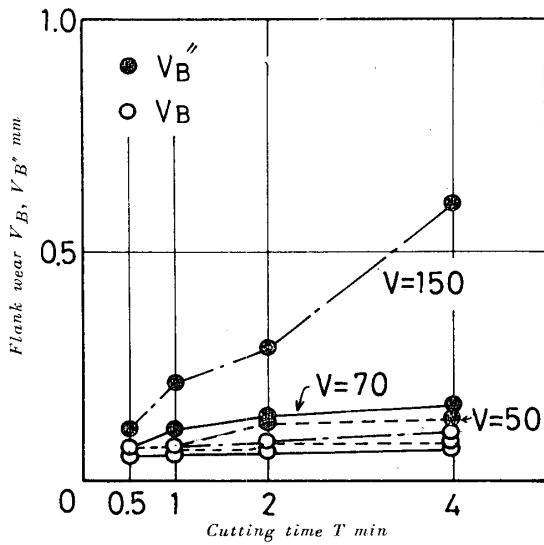


Fig. 10 Relation between flank wear and cutting time
 $V \times d \times f = 50 \sim 150 \text{ m/min} \times 1.5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm/rev}$,
 Tool, P 10 (throw-away type)

M20で、高速度鋼工具は耐熱性、セラミックスでは靱性に劣るため適さない。切刃の形状はある程度正のすくい角をつけた方が好ましく、すくい角が負になると V_B'' が著しくなり好ましくない。

なお、セラミック工具の場合削り速度が大きくなるほど、 V_B'' が減少する傾向にあるが、削り速度の増大によって V_B'' が若干減ってもビビりが生じ易くなるため、最大 $V=170 \text{ m/min}$ にとどめた。

本実験では負のすくい角をつけると、超硬工具、セラミックスのいずれの場合も著しい V_B'' が発生して好ましくない。 V_B'' の発生する原因としては溶着物の分離脱落、被削材のかえり、加工硬化などが考えられるが、SUS 27は加工硬化の著しい材料であるので、加工硬化について調べてみた。

実験にさいしては、まず高速度鋼工具(すくい角 20°)で、いずれの場合も同一切削条件で前加工をした。つづいてすくい角の異なる超硬工具で切削をした。その時に得られた切くずの裏面のかたさは、横方向の硬度分布を測定するため、切くずを埋込み樹脂に埋込んだ後、マイクロビッカース硬度計(荷重 200 g)にて硬度を測定した。

測定の際には切くず裏面に凹凸があるのでビッカースの圧痕はかならずしも四角にならないので、著しく歪んだ四角形の圧痕は測定せず、四角形の圧痕のみの3回の平均値をもってグラフにプロットした。その結果をFig. 11に示す。

Fig. 11より切くず裏面の硬度は工具のすくい角が負になるほど硬くなり、加工硬化が著しい、すなわち加

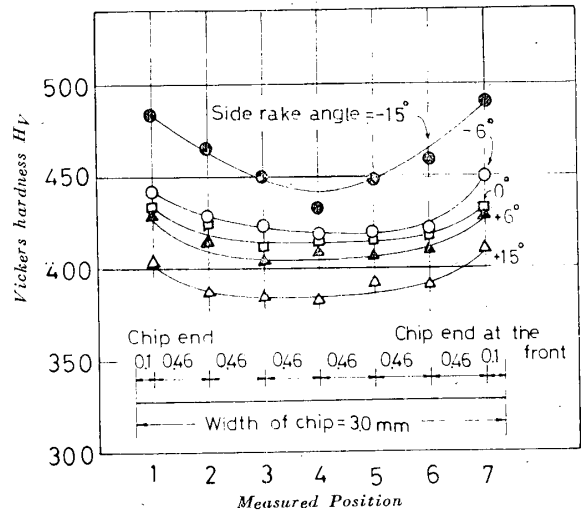


Fig. 11 Hardness of the back face of chips
 $V \times d \times f = 150 \text{ m/min} \times 3.0 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm/rev}$
 Tool, M20 (0° , Var, $6^\circ, 6^\circ, 15^\circ, 15^\circ, 0.7R$)

工変形抵抗の大きい切れ味の悪い切削を行うことになる。特に切くずの端面でかたさがより硬くなっていることはそれだけ切くず端部に相当する部分の境界摩擦部は大きな力をうけ、チッピングを起す。そのための切くずのかえりによる衝撃により、ますますチッピングが増大することを示す。それ故、加工硬化の著しいSUS27での V_B'' の生成には、加工硬化の影響がかなりあると思う。熱伝導率の劣るセラミックスの境界部には大きな温度勾配を生じ、熱亀裂も起り易いことも原因していよう。なお切くず裏面の硬度測定では、切込みを 3.0 mm として行った。

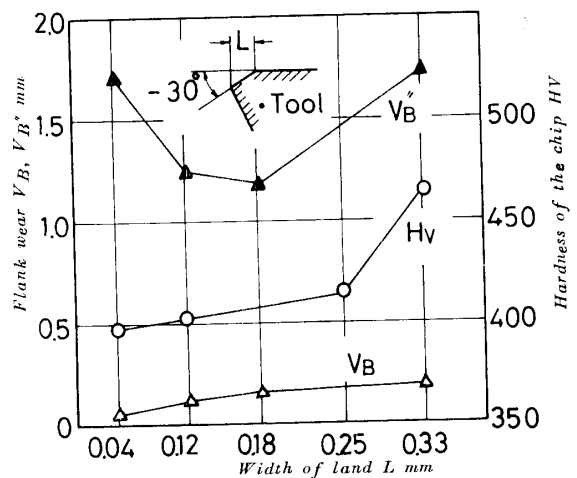


Fig. 12 Flank wear and hardness in each width of land
 $V \times d \times f = 70 \text{ m/min} \times 1.5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm/rev}$,
 Cutting time $T = 4 \text{ min}$,
 Hardness measured in the center of chips

セラミックスの V_B'' は前述したごとく、小さな欠けの集合であり、 V_B'' の値も著しく大きいので、切削に -30° の面取りを行って対策を試みた。その結果 Fig. 12に示すごとく、面取り幅が大きくなるほど切くず裏面のかたさ（中央部）は硬くなり、 V_B は大きくなった。しかし V_B'' は Fig. 8のそれより小さくなり、面取りをすると効果があるが、その量を激減することはできなかった。

従来軟質な鋼材ではセラミックスは圧着物分離損傷のため不適といわれているが、SUS27もその例で可成り高速でも境界部のチップングを多くし、不可であった。スローアウェイ型工具はその構造上すくい角が負であること、取付け角も 75° と大きいことにもその原因があろう。

4. 結 言

以上の実験結果より、以下の結論を得る。

1. SUS27の適合工具は全般的にみると、超硬工具にて、M20が適していた。

2. 連続旋削にみられた溶着物の発生は切削温度の低い断続切削などでは、その分離による損傷が考えられる。また連続旋削では特に難削材とはいえ、溶着物の発生傾向が著しいため、クレータ摩耗は可成り高速でないと発生しない。フランク摩耗はオーステナイト相で顕著な炭化物の析出がないため少ない。

3. 工具のすくい角が負になると V_B'' が大きくなり、正のすくい角の方が好ましい。

4. V_B'' の発生は切くず裏面のかたさの分布より、加工硬化の影響、いいかえれば境界部で変形抵抗が大きかったことを示そう。

本報告をまとめるにあたり当時学生であった大野和之、亀井英明両君に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) M.C. Shaw and Mitarbeiter: Machining Titanium I and II, 1954 and 1957.

(昭和44年4月16日受理)