

© 1987 ISIJ

過冷オーステナイト状態の軸受鋼切削加工において工具寿命に影響を及ぼす諸要因

論文

藤岡 康夫*・大嶋 三郎*・室 博*²

Many Factors Influencing the Tool Life on the Machining of Bearing Steel in Supercooled Austenitic State

Yasuo FUJIOKA, Saburo OSHIMA and Hiroshi MURO

Synopsis:

A new machining process, called auscutting, has been developed in which the cutting operation is performed in supercooled austenitic state during quenching. In order to realize a new manufacturing process for bearing races with auscutting, it is desired to obtain the satisfactory tool life. In this paper, from the viewpoint of the improvement on the tool life many factors which influence the tool life are examined and the methods for stabilizing and lengthening the tool life are considered.

The results obtained are summarized as follows:

1) The short-lived factors in auscutting are the vibration caused by the saw-toothed chip formation, a drop of the deflective strength of the tool material by high cutting temperature and the adhesion failure of the work material. The methods for improving the tool life are the improvement on the stiffness of machine parts such as the tool holder, the suitable cutting speed of about 100 m/min and the increase of the nose radius of the tool.

2) As the frequency of the saw-toothed chip formation is increased after the tool failed in auscutting, it is possible to detect the tool failure by the change of the vibration frequency.

Key words: tool life; machining; ceramic tool; bearing steel; supercooled austenite; vibration; auscutting; saw-toothed chip.

1. 緒 言

高炭素クロム軸受鋼を用いて軸受部品を製造する工程には多くの加熱・冷却工程が含まれており、多大の熱エネルギーを必要としている。これに対し、筆者らは省エネルギー対策の一つとしてオースカッティングと称する新しい加工法を提案した^{1)~5)}。それは焼入冷却途中の過冷オーステナイト状態で切削加工を行い、その後空冷によりマルテンサイト変態を起こさせ、焼入硬化を完了させる方法である。本方法によれば加熱・冷却工程が大幅に省略できる⁵⁾ばかりでなく、適切な切削条件を選ぶことにより、研削代の低減を図ることができる²⁾。

オースカッティングは通常の切削方法とは異なり、①被削材温度が約 200°C 高いこと、②超硬工具では工具摩耗が著しく、 Al_2O_3 に TiC を含有した黒セラミック工具が適する¹⁾ こと、③鋸歯状切りくずを生ずるため、

びびり振動を伴う⁴⁾ などの特徴が認められる。オースカッティングを軸受製造工程に取り入れ実用化を図るためには工具寿命を安定なものとし、長寿命であることが望まれる。本研究は実用的な見地から、オースカッティングにおいて黒セラミック工具の寿命に影響を及ぼしていると考えられる諸要因について実験研究を行い、それらを定量的に解明することにより、工具寿命の延長を図ることを目的としている。

2. 試験片及び熱処理方法

試験片として高炭素クロム軸受鋼(SUJ 3)の軸受素材(ラジアル玉軸受 6320 内輪及び外輪)を用いた。本試験片は熱間ローリング鍛造法により作製し、鍛造後従来どおり球状化焼なましを施した。試験片の外径、内径及び幅寸法は内輪: 138 mm, 96 mm, 50 mm であり、外輪: 218 mm, 177 mm, 50 mm である。SUJ 3 の化学組成

昭和 61 年 5 月 12 日受付 (Received May 12, 1986)

* エヌ・テー・エヌ東洋ベアリング(株)総合技術研究所 (General Technical Laboratory, NTN Toyo Bearing Co. Ltd., 1380 Higashikaizuka Iwata Shizuoka Pref. 438)

*² エヌ・テー・エヌ東洋ベアリング(株)総合技術研究所 工博 (General Technical Laboratory, NTN Toyo Bearing Co. Ltd.)

Table 1. Chemical compositions of SUJ 3.

(wt %)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.95 -1.10	0.40 -0.70	0.90 -1.15	<0.025	<0.025	0.90 -1.20	—

を Table 1 に示す。

オースカッティング用の熱処理としては、試験片を電気炉中で $850^{\circ}\text{C} \times 50 \text{ min}$ 加熱した後約 200°C の油中に急冷し、約 3.5 min 保持後油中から取り出した。この時の試験片温度は約 210°C で、過冷オーステナイト状態である。その後すばやく旋盤にチャッキングし、切削試験を行つた。切削実験中に被削材の温度が低下しないよう、セラミックヒーターを内蔵した保温チャック²⁾を使用した。本研究におけるオースカッティング用熱処理条件は、以下の実験において特に記述しない場合はすべて同じとした。

3. 振動の工具寿命に及ぼす影響

前報⁴⁾で明らかになったようにオースカッティングでは鋸歯状切りくずが生成されることにより、軸受鋼焼なまし材の通常切削時に比べて 10 倍以上の大きさのびびり振動を発生することがある。振動の発生は工具寿命に悪影響を及ぼすことが予想されるため、種々の切削条件下で切削実験を行い、振動が工具寿命に及ぼす影響について調べた。

3.1 実験方法

試験片として 6320 外輪素材を用い、外径面を順次 10 回繰り返しオースカッティングすることにより、振動の発生状況及び工具損耗状況を調べた。切込み量を $D_c = 0.5 \text{ mm}$ とし、切削速度及び送り量を変化させ、切削条件の変化による影響を調べた。また工具ホルダーのオーバーハング量を変えて発生する振動の大きさの変化が工具寿命に及ぼす影響を調べた。

使用した工具は市販の黒セラミックスローアウェイチップ (Al_2O_3 に約 30 wt% の TiC を含有したもの)であり、主にダイヤ形 75° のものを使用した。工具切削形状は (-4° , -6° , 4° , 6° , 7.5° , -7.5° , R) とし、刃先のプリホーニングはすべて $-25^{\circ} \times 0.2 \text{ mm}$ とした。工具形状の影響を調べるためにノーズ半径 (R) は 1.2 mm 及び 2.0 mm の 2 種類とし、さらにノーズ R の大きい丸形チップ ($R=6.35 \text{ mm}$) も使用した。

鍛造表面層の影響 (第 5 項で詳述) を取り除くため各試験片とも過冷オーステナイト状態に熱処理後、別の工具で幅面及び外径面の表面層を除去後切削試験を開始した。工具ホルダーの側面に加速度ピックアップを取り付

け、切削中の振動を測定し、振動の大きさ及び振動周波数について分析した。

3.2 実験結果

3.2.1 振動の大きさの影響

Fig. 1 に切削条件の違いによる振動の大きさの変化を加速度振幅の大きさで示す。振動加速度は送り量及び切削速度の増大に伴い大きくなる傾向が認められる。同図中に比較のために軸受鋼球状化焼なまし材の通常切削の場合を示したが、同一切削条件ではオースカッティングの方が数 10 倍程度振動レベルが大きい。また同じオースカッティングにおいても工具ホルダーのオーバーハング量を変えることにより振動加速度の大きさは大幅に変化する。オーバーハング量大 ($L=30$: 工具取り付け台から工具先端までが 30 mm) の方が小 ($L=6 \text{ mm}$) に比べて振動レベルが数倍大きくなっている。

オースカッティングの切削速度 $V=100 \text{ m/min}$ において工具ホルダーのオーバーハング量の大小で工具損耗状況を比較すると振動加速度の小さい $L=6$ の場合は 10 回切削終了後で送り量 $f=0.2 \sim 0.5 \text{ mm/rev}$ のいずれの場合にも工具欠損は認められなかった。一方振動加速度の大きい $L=30$ の場合は $f=0.3 \text{ mm/rev}$ でチッピング、 $f=0.5 \text{ mm/rev}$ では欠損が発生しており振動レベルの大きい方が工具欠損を起こしやすいといえる。

他方、工具摩耗量に関しては Fig. 2 に 10 回切削終了後の逃げ面摩耗幅 (V_B) 及びすくい面摩耗の最大幅

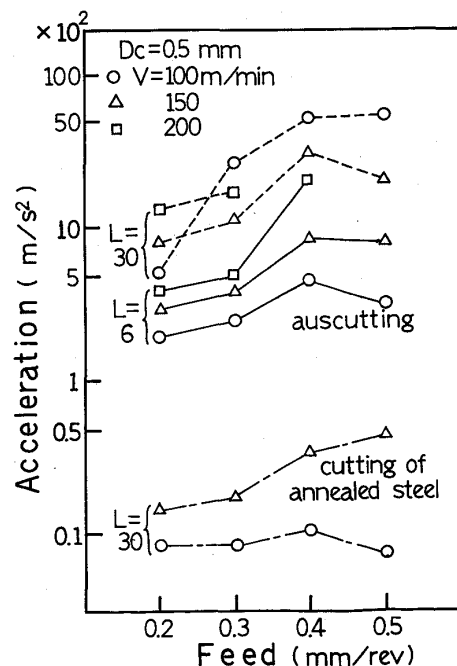


Fig. 1. Effect of cutting conditions on the acceleration in auscutting and cutting of annealed steel.

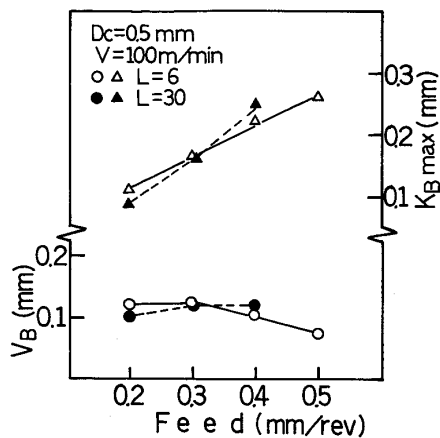


Fig. 2. Comparison of the tool wear by the change of vibration.

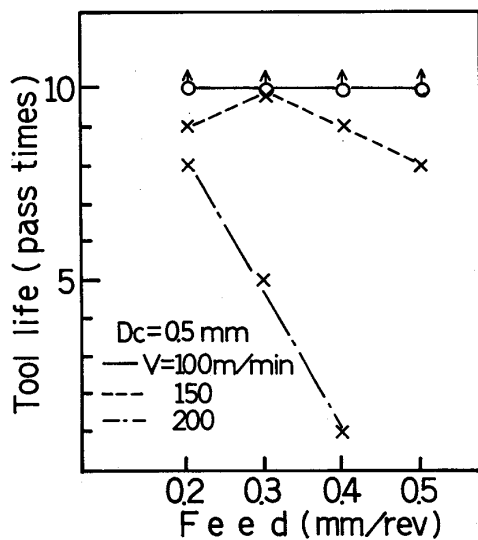


Fig. 3. Effect of cutting conditions on tool life.

($K_B \max$) を示したが、オーバーハングの大小両条件でほとんど差はなく、振動レベルの大きさと工具摩耗量については明瞭な関係が認められない。

3.2.2 切削条件の影響

Fig. 3 に切削速度と送り量を変化させた場合の工具寿命 (欠損に至るまでの切削回数) を示した。 $V=100$ m/min の場合は $f=0.2 \sim 0.5$ mm/rev の各切削条件下で 10 回以上切削可能であったものが、 $V=150$ m/min, 200 m/min と切削速度が高くなる程明らかに工具寿命が短くなる。また送り量に関しても特に切削速度が高い領域では高送り程寿命が短い。

以上の事実はセラミック工具の欠損に関して振動が悪影響を及ぼすと同時に高速切削になると刃先温度が高温 (例えば $V=200$ m/min, $D_c=0.5$ mm, $f=0.2$ mm/rev の条件では約 1100°C になる³⁾) になり、セラミック工具

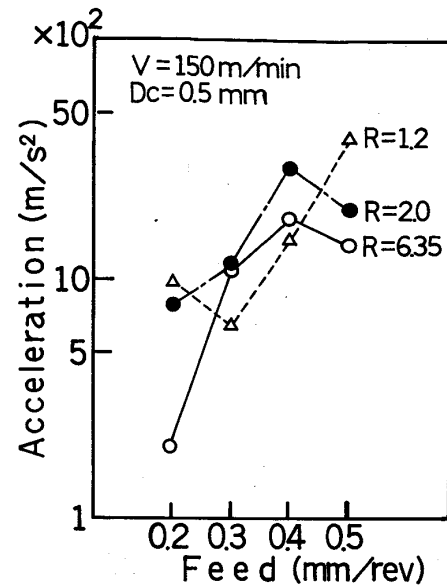


Fig. 4. Variation of the acceleration in auscutting with the change of nose radius of tool.

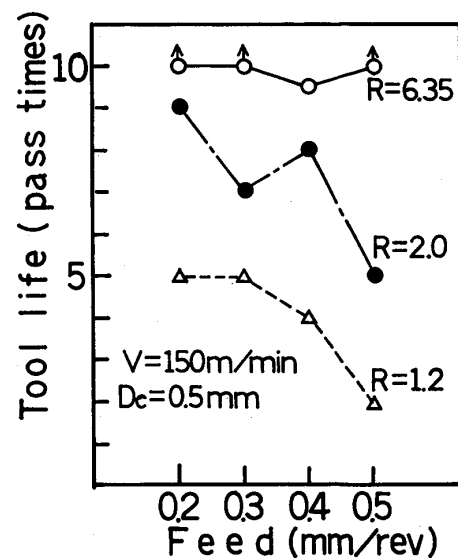


Fig. 5. Effect of the nose radius of tool on tool life.

の強度が低下するために短時間で欠損に至るものと考えられる。オースカッティングの切削条件としては、欠損に至るまでの切削除去能率を考え、切削速度 $V=100$ m/min 程度、送り量 $f=0.3 \sim 0.4$ mm/rev を選ぶのが適切であると考えられる。

3.2.3 工具形状の影響

Fig. 4 及び Fig. 5 にノーズ R が 1.2 mm, 2.0 mm, 6.35 mm の場合の振動発生状況及び工具寿命を示す。切削条件は $D_c=0.5$ mm, $V=150$ m/min で送りを $f=0.2 \sim 0.5$ mm/rev と変化させた。

発生する振動の大きさはノーズ R が変化してもあま

り変化がなく、送り量変化による影響の方が大きい。一方工具寿命は明らかな差が認められ、ノーズ R が大きい程すべての送り条件下で工具寿命が長くなっている。

このことは、オースカッティングにおけるセラミック工具の寿命が振動と刃先温度が高くなることによつて起こる欠損が主要因となつているため、ノーズ R を大きくすることにより刃先への応力集中及び熱集中が緩和された効果によるものと考えられる。

4. 被削材温度の工具寿命に及ぼす影響

オースカッティングは被削材の組織が焼入冷却途中の過冷オーステナイト状態での切削加工であり、SUJ 3 の等温変態曲線から判断して、切削時の被削材温度は等温変態開始までの時間の長い約 200°C を標準としている。

一方、工具寿命を延ばすという立場では、被削材温度が高くなれば硬さが低下し切削抵抗が減少することが期待でき、また逆に被削材温度が低くなれば刃先温度が低くなることが期待できるであろう。そこで本実験では被削材温度を $250^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ の間で変化させ、被削材温度の工具寿命への影響を調べ工具寿命の立場から適切な被削材温度を検討した。

4.1 実験方法

Table 2 に熱処理条件を示す。b) が標準的な熱処理条件で被削材温度は約 210°C である。その他は油温及び冷却時間を変化させることにより、被削材温度を a) 250°C 、c) 160°C 、d) 120°C と変化させた。本熱処理条件下における M_s 点は約 170°C である²⁾ ので、 160°C の被削材温度ではオースカッティング時にすでに数%マルテンサイト変態が開始している。また 120°C 切削時は約 20~30% マルテンサイト変態が起こっている¹⁾ 状態である。

切削実験は 6320 外輪を用いて行い、外径面を順次オースカッティングすることにより振動の発生状況及び工具の損耗状況を調べた。切削条件は $V=100\text{ m/min}$ 、 $D_c=0.5\text{ mm}$ 、 $f=0.3\text{ mm/rev}$ とした。工具は前述のダイヤモンド形 75° 黒セラミックチップでノーズ R は 2.0 mm

Table 2. Heat treatment conditions and temperature of workpieces.

Workpiece No.	Heat treatment condition		Temperature of workpiece $^{\circ}\text{C}$
	Heating	Quenching in oil	
a	$850^{\circ}\text{C} \times 50\text{ min}$	$200^{\circ}\text{C} \times 2\text{ min}$	250
b	$850^{\circ}\text{C} \times 50\text{ min}$	$200^{\circ}\text{C} \times 3.5\text{ min}$	210
c	$850^{\circ}\text{C} \times 50\text{ min}$	$180^{\circ}\text{C} \times 3.5\text{ min}$ + air cooling	160
d	$850^{\circ}\text{C} \times 50\text{ min}$	$180^{\circ}\text{C} \times 3.5\text{ min}$ + air cooling	120

とした。

4.2 実験結果

Fig. 6 に振動測定結果を示す。切削時の振動の大きさは被削材温度が高い方が大きくなつており、ほぼ M_s 点に相当する 160°C 切削の場合が最小である。また M_s 点以下の 120°C 切削では再び振動が少し大きくなっている。

一方工具寿命は振動の大きさとは一致せず、 120°C 切削が最も工具寿命が短く、2 回目の切削途中で大きな工具欠損を起こし切削不能となつた。また他の切削では振動の大きさに差があつたものの、いずれも 10 回切削後 (約 11 min の切削時間) でチップングや欠損はなく、逃げ面摩耗幅 (V_B) は約 0.1 mm でありほとんど差は認められなかつた。

同一切削条件にもかかわらず振動の大きさに差が認められるのは被削性の違いによるものの他に、被削材温度の変化に伴つて鋸歯状切りくずの生成周波数が変化したことによる影響がある。すなわち被削材温度が変化すると鋸歯状切りくずのき裂傾角 (自由面側に発生するクラックが切削方向となす角度) が変化する⁴⁾ ために、切りくず生成周波数が変化する。振動が一番大きかつた 250°C 切削ではき裂傾角が最も小さく、切りくず厚さが厚く、切りくず生成周波数が 210°C 切削 (約 6.3 kHz) より低くなり、工具ホルダーの固有振動数 (約 4.8 kHz) に近づいたために共振現象を起こしていることによるものである。

本実験では工具寿命に関して 160°C 、 210°C 、 250°C 切削ではほとんど差は認められなかつたが、振動が大きくなれば工具欠損を起こしやすいことや、仕上げ面粗さが悪化すること、またマルテンサイト変態量が多くなれば工具欠損を起こすことから総合的に判断して実用上は M_s 点直上の温度域での切削が適していると考えられ

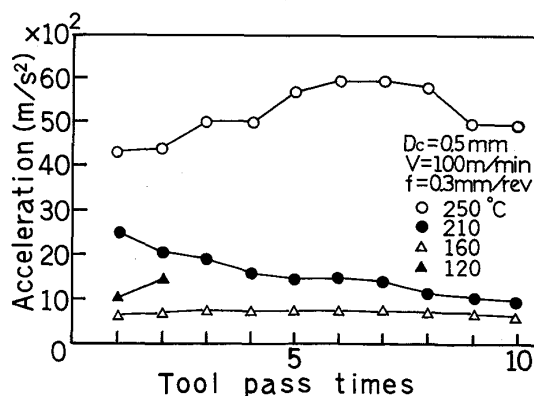


Fig. 6. Effect of the temperature of workpiece on the acceleration in auscutting with the change of tool pass times.

る。

5. 鍛造表面層の工具寿命に及ぼす影響

5.1 脱炭層と M_s 点

熱間ローリング鍛造法により作製された軸受素材には加熱時にできる酸化スケールが付着しており、また表面層では脱炭が起こっている。脱炭層では M_s 点が高くなるため、オースカッティング時すでにマルテンサイト変態が起こっており被削性が悪くなっていることが予想される。そこで軸受素材にオースカッティング用熱処理を施した後の表面層のミクロ組織及び硬さを調べた。結果を Fig. 7 に示す。表面下約 0.5 mm 深さまで焼入硬さの低下が認められ、ミクロ組織的にも表面層は炭化物が少なく脱炭していることがわかる。マルテンサイト中に固溶している炭素量と焼入最高硬さとの関係⁶⁾ から推定すると表面下 0.1 mm 深さ位置では炭素量は約 0.3% と考えられる。

一方炭素量は M_s 点に大きく影響を及ぼすことが知られており M_s 点は例えば ANDREWS の式⁷⁾ から計算すると概略 $M_s=360^\circ\text{C}$ となり、オースカッティング温度 (200

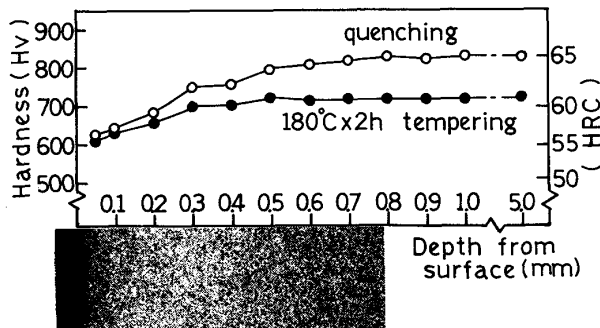


Fig. 7. Hardness distribution and microstructure after quenching at the surface layer of the hot forged workpiece.

～220°C) では表面層だけはすでにマルテンサイト変態が始まっており、硬さが高く被削性が悪くなっていると思われる。

5.2 実験方法

鍛造表面層が工具寿命にどの程度悪影響を及ぼすかを調べる目的で、イ) 鍛造表面層がある場合とロ) それを除去した場合の切削比較実験を行った。

試験片として 6320 内輪素材を用い、イ) はそのまま熱処理を行い、ロ) はあらかじめ表面層を約 0.5 mm 深さまで旋削により除去した後熱処理を行い、それぞれ同一切削条件下でオースカッティングを行った。工具はこれまでの実験結果で工具寿命が最も良かった丸形黒セラミック工具を用い、外径面、内径面及び幅面の全工程の切削を行った。Fig. 8 は本実験における切削工程図である。工程 1 (OP 1) では①の工具で幅面を②の工具で内径面を切削し、ワークを反転後工程 2 (OP 2) で同様に残りの部分を切削し、最後に③の工具で外径面を切削した。切込み量は実際の取り代に合わせ $D_c=1.5$ mm とし、切削速度及び送り量はそれぞれ $V=200$ m/min, $f=0.2$ mm/rev とした。またこれまでの実験結果で最適切削条件と思われる $V=100$ m/min, $f=0.3$ mm/rev でも同様の切削を行い工具寿命を調べた。

5.3 実験結果

鍛造表面層のある場合及び除去した場合の試験片を連続して 14 個切削した各工具の損耗状況を Table 3 にまとめて示す。工具の観察位置は表中に示したように A はアール部 (チャンファー部) の切削位置に相当し、B は直線部の切削位置に相当する。工具の欠損に関して、内径切削工具の A 部では鍛造表面層がある場合に 0.2 mm 程度の大きさのチッピングが認められるのに対し、鍛造表面層を除去した場合は欠損が発生していない。また幅面切削工具の A 部及び内径切削工具の B 部では両条件ともに欠損が認められるが、鍛造表面層がある場合の方が欠損の

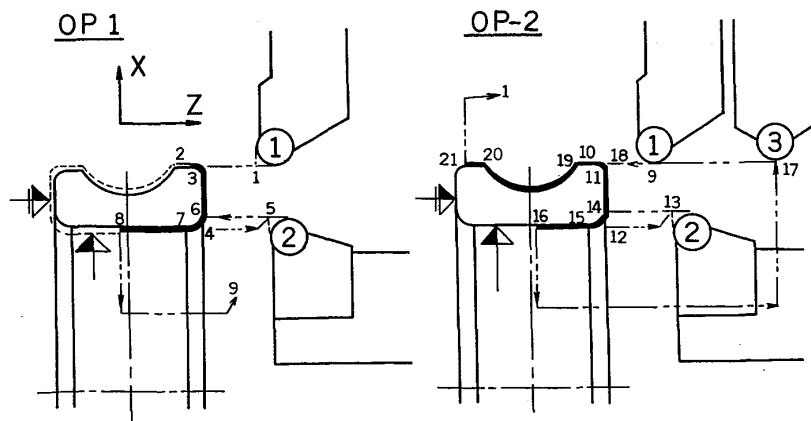


Fig. 8. Process drawing for cutting operation of the bearing inner race.

Table 3. Effect of the surface layer by forging on the failure and the wear of tools.

tool	failure and wear	surface layer by forging		observed position
		existing	removed	
side tool	A: failure	(0.5)	(0.1)	① B ↑ A
	B: failure V_B (mm)	— 0.07	— 0.07	
inside tool	A: failure	(0.2)	—	② B ↑ A
	B: failure V_B (mm)	(0.2) 0.1	— 0.09	
outside tool	B: failure	—	—	③ B ↑ A
	V_B (mm)	0.05	0.05	

(): size of failure(mm), —: no failure

Table 4. Variation of the failure and the wear of tools with numbers of tested workpieces at the cutting speed of 100 m/min and 200 m/min.

Tool	Failure and wear	Cutting speed m/min	Numbers of tested workpieces		
			14	28	43
Side tool	A: Failure	$V=200$ $V=100$	(0.5) —	(1.5) —	(2.0) —
	B: Failure	$V=200$ $V=100$	— —	— —	— —
	V_B (mm)	$V=200$ $V=100$	0.07 0.04	0.20 0.09	0.28 0.12
Inside tool	A: Failure	$V=200$ $V=100$	(0.2) —	(0.2) —	(0.5) —
	B: Failure	$V=200$ $V=100$	(0.2) —	(0.2) —	(0.3) —
	V_B (mm)	$V=200$ $V=100$	0.1 0.05	0.25 0.10	0.3 0.15
Outside tool	B: Failure	$V=200$ $V=100$	— —	— —	(0.1) —
	V_B (mm)	$V=200$ $V=100$	0.05 0.04	0.15 0.08	0.20 0.11

(): Size of failure (mm), —: No failure

程度が大きくなっている。以上のことより鍛造表面層のある場合の方がわずかではあるが欠損（チッピング）が発生しやすいと考えられる。

一方工具摩耗に関しては、各工具ともに逃げ面摩耗幅では全く差がなく、鍛造表面層による悪影響は認められない。

Table 4 には鍛造表面層がある場合について、引き続き試験片を 43 個まで切削した時の工具損耗状況の変化を示す。比較として切削条件が $V=100$ m/min, $f=0.3$ mm/rev の場合の結果も示した。工具の観察位置（A 及び B）は Table 3 中で示した位置と同じである。

$V=200$ m/min, $f=0.2$ mm/rev の切削条件では、幅面切削工具の A 部で発生した欠損は 28 個、43 個と切削個数の増加に伴い、その大きさが 1.5 mm, 2.0 mm と大きくなっている。B 部では欠損はないが逃げ面摩耗幅が 0.20 mm, 0.28 mm とほぼ切削個数に比例して大きくなっている。また他の外径切削工具及び内径切削工具についても、ほぼ同様の傾向が認められる。

一方、 $V=100$ m/min, $f=0.3$ mm/rev の切削条件では各工具ともに A 部及び B 部に欠損は認められず、逃げ面摩耗幅も $V=200$ m/min に比べて約半分と小さい。

以上のように鍛造表面層がある場合でも、切削速度 $V=100$ m/min, $f=0.3$ mm/rev の切削条件では欠損も発生せず、かつ逃げ面摩耗も少なく、鍛造表面層の存在は工具欠損寿命に悪影響を及ぼすものの適切な切削条件を選ぶことにより実用切削上はほとんど問題がない程度である。適切な切削条件下での工具寿命は例えば $V_B=0.3$ mm 基準で工具交換をとした場合に、6320 内輪で約 100 個（内径工具の直線部の実切削時間で約 50 min に相当する）の寿命が見込める。

6. 考 察

6.1 黒セラミック工具の損耗形態

オースカッティングにおいて黒セラミック工具が寿命に至る主要因は本研究の実験結果から 1) 鋸歯状切りくず生成に伴う振動の発生及び 2) 高速切削による刃先温度の上昇によつて起こる工具欠損であった。

セラミック工具は超硬工具に比べて高硬度で耐熱性が高いという優れた特性がある反面、じん性が低く工具の耐欠損性に関しては劣っている。Fig. 9 に市販工具の高温抗折力の比較⁸⁾を示す。本研究で用いた黒セラミック工具 ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$) の抗折力は室温で約 800 MPa であり、白セラミック工具 (高純度 Al_2O_3) より高いが、超硬工具の約半分とじん性が低い。一方、高温での抗折力に関しては 900°C までは全く低下せず、超硬工具に比べてセラミック工具が高速切削に有利であると言われている理由の一つになっている。しかし、高温抗折力も

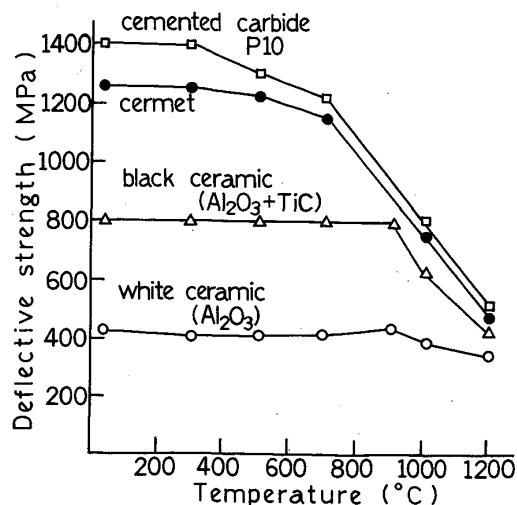
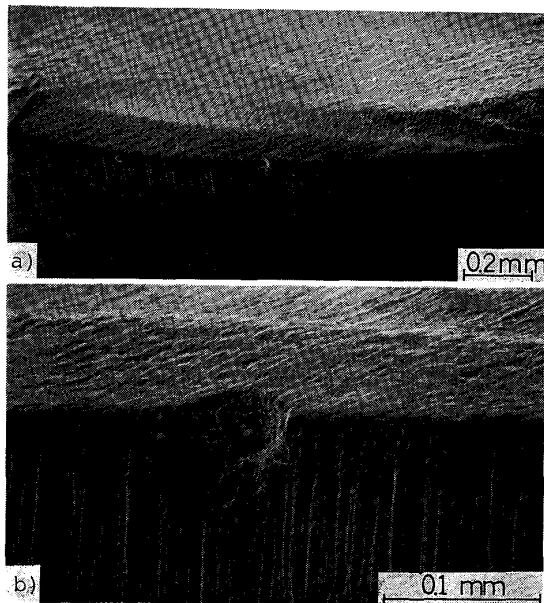


Fig. 9. Relationship between defective strength of tools and temperature.

1000°C を超えると急激な低下が認められ、強度的には刃先温度を1000°C 以下として使用する方が望ましい。既報³⁾で示したようにオースカッティングは通常の切削方法に比べると刃先温度が高く、切削速度 $V=100$ m/min, 150 m/min, 200 m/min の条件ではそれぞれ950°C, 1050°C, 1100°C であり、本研究の実験結果で $V=100$ m/min の場合が工具寿命が良く、 $V=150$ m/min や 200 m/min では短寿命であつたこととよく対応している。従つてオースカッティングの切削条件としては刃先温度が1000°C を超えないように切削速度を $V=100$ m/min 程度におさえることが重要である。

Photo. 1 には黒セラミック工具の損耗状態を SEM で観察した例を示す。a) は $V=100$ m/min, $D_c=0.5$ mm, $f=0.3$ mm/rev, 工具ホルダーのオーバーハング量 $L=30$ mm の条件下で10パス切削終了後の状況であり、切れ刃中央部に約0.07 mm 大のチッピングが認められる。逃げ面摩耗はほぼ長方形で正常摩耗であり、前逃げ面及び横逃げ面の境界摩耗は認められない。また工具のプリホーニング部からすくい面部にかけて浅く摩耗している。b) はa) の中央部を拡大したものであり、逃げ面及びすくい面に付着物が認められる。この付着物は EPMA (X線マイクロアナライザー) による分析の結果 Fe であることがわかり、被削材が凝着したものと考えられる。



a: Appearance
b: Magnified central part of (a)

Photo. 1. SEM photographs of the failure and the wear of the ceramic tool after auscutting ($V=100$ m/min, $D_c=0.5$ mm, $f=0.3$ mm/rev).

逃げ面に凝着物が付着する例としてはノジュラ鋳鉄などを超硬工具で高速切削する場合⁹⁾¹⁰⁾が知られており、セラミック工具には発生しなかつたことから、工具材・被削材間の親和力がかなり有力な原因になつていていると考えられている。一方、鳴瀧¹¹⁾はセラミック工具でも切削温度が高温になれば被削材中の CaO や SiO_2 と反応し工具摩耗が増大することを報告しており、 Al_2O_3 が FeO と反応し $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ スピネル層の形成によつて Fe の凝着が増大するとしている。

オースカッティングにおける Fe の凝着現象も $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ スピネル層の形成によるものと考えられるが、工具摩耗に対する悪影響よりも Photo. 2 に示したように凝着はく離現象が起こることが、工具にチッピングや欠損を発生させる一因となつていていると考えられる。

セラミック工具が欠損に至る他の要因として熱クラックの発生が考えられるが、種々の切削条件下での工具損耗状況を観察したが、杉田¹²⁾が報告しているような熱クラックの発生は認められなかつた。

以上述べたようにオースカッティングにおける黒セラミック工具の欠損原因は1) 鋸歯状切りくず生成による振動の発生2) 刃先温度の上昇による工具材抗折力の低下3) Fe の凝着によるはく離現象が挙げられる。これらの対策として実用的には1) 工具ホルダー等の機械的剛性を向上させ振動を低減させる2) 切削速度を100 m/min 程度におさえ、刃先温度を1000°C 以下とする3) 工具ノーズ R を大きくすることが有効であると考えられる。

6.2 振動周波数の変化と工具の損耗

オースカッティングでは鋸歯状切りくずの生成に伴い大きい振動が発生する。本項ではその振動周波数に着目し、工具の損耗状況との関連について考察する。

Fig. 10 は工具摩耗とピーク振動周波数の関係を示したもので、 $V=100$ m/min, $D_c=0.5$ mm, $f=0.2 \sim 0.5$

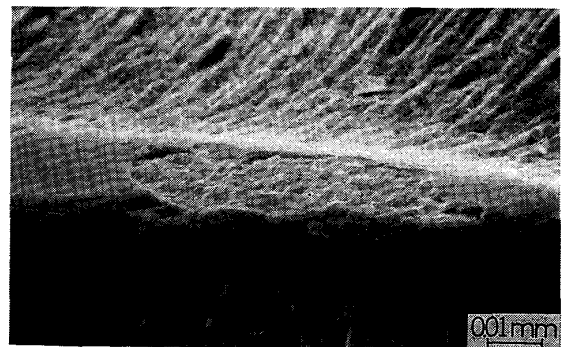


Photo. 2. An adhesion failure at the cutting edge of the ceramic tool.

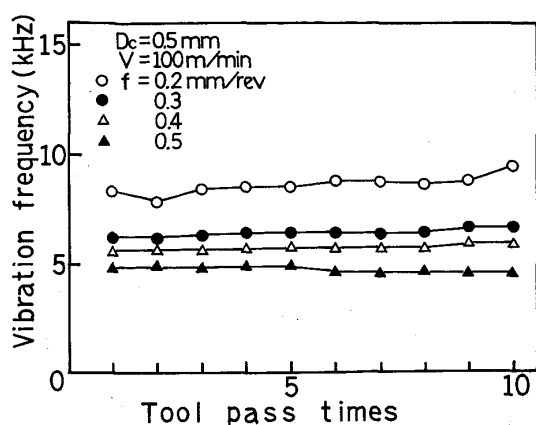


Fig. 10. Relationship between tool wear and vibration frequency.

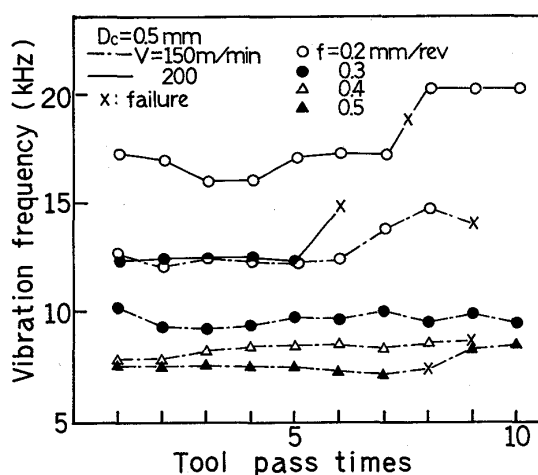


Fig. 11. Relationship between tool failure and vibration frequency.

mm/rev, ダイヤ形 75° チップ, ノーズ $R=2.0$ mm の場合である。ピーク振動周波数は切削中に発生する振動を F. F. T. (Fast Fourier Transformation) アナライザーにより周波数分析し、最も大きい周波数成分を求めたものである。いずれの場合も 10 パス切削中に変化は認められず、工具摩耗が進行しても発生するピーク振動周波数は変化しない。ピーク振動周波数は送り量が大きくなる程低くなっており、前報⁴⁾での実験結果と同じ傾向を示している。

一方、Fig. 11 には工具にチップングや欠損が起こった場合のピーク振動周波数の変化状況を示した。図中、 $V=150$ m/min, $f=0.3$ mm/rev 以外の場合は 10 パス切削終了前に何らかの工具欠損を起こした場合であり、欠損を起こしたと思われる後の切削においてはピーク振動周波数がいずれも高くなっている。本切削試験は欠損が発生したと思われるでも切削状況に大きな変化が現れない

場合はそのまま切削を続行し、明らかに大きな欠損が起こり切削状況が大きく変化した時は切削試験をその時点で中止した。

欠損を起こした場合にピーク振動周波数が上昇するのは工具の切れ刃が欠損することにより部分的に切込み量及び送り量が小さくなり、その結果鋸歯状切りくずの生成周波数が上昇するためと考えられる。従つてオースカッティングでは切削中に発生する振動の周波数を分析することにより工具の欠損を検出できる可能性がある。

7. 結 言

焼入冷却途中の過冷オーステナイト状態で切削加工を行うオースカッティングにおいて、工具寿命に悪影響を及ぼすと考えられる諸要因について実験研究を行い、それらを定量的に比較分析することにより工具寿命の延長を図つた。

得られたおもな結果は次のとおりである。

1) 工具寿命が短くなる要因は①鋸歯状切りくずの生成による振動の発生②刃先温度の上昇による工具抗折力の低下③被削材の凝着はく離現象等によつて起こる工具欠損であり、それらの対策としては①工具ホルダー等の機械剛性を向上させる②切削速度を $V=100$ m/min 程度におさえる③工具ノーズ R を大きくすることが有効である。

2) $V=100$ m/min, $D_c=1.5$ mm, $f=0.3$ mm/rev, ノーズ $R=6.35$ mm の適切な切削条件下では工具欠損を起こさず、また逃げ面摩耗も少なく、 $V_B=0.3$ mm 基準で約 50 min の寿命が見込める。

3) 切削中に工具欠損が発生した場合に、鋸歯状切りくずの生成周波数が上昇する現象が認められ、セラミック工具の欠損検出方法として利用できる。

文 献

- 1) Y. FUJIOKA, H. TANI and H. MURO: Proc. Intern'l Symp. on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel (1977), p. 323 [ISIJ ASM]
- 2) 藤岡康夫, 室 博: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 404
- 3) 藤岡康夫, 室 博: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 1147
- 4) 藤岡康夫, 大嶋三郎, 室 博: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 807
- 5) 藤岡康夫, 室 博: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 1881
- 6) 矢島悦次郎: 機械・金属材料, (1979), p. 130 [丸善]
- 7) K. W. ANDREWS: JISI, **7** (1965), p. 721
- 8) 中島利勝, 鳴瀧則彦: 機械加工学 (1984), p. 70 [コロナ社]
- 9) K. J. TRIGGER, L. B. ZYLSTRA and B. T. CHAO: Trans. ASME, **74** (1952), p. 1017
- 10) 人見勝人, 咸 仁 英, G. L. THUERING: 日本機械学会論文集 27-184 (1961), p. 1909
- 11) 鳴瀧則彦, 村越昭男: 精密機械, **42** (1976), p. 221
- 12) 杉田忠彰, 山田 巖: 精密機械, **30** (1964), p. 727