TiN 被覆高速度鋼工具による 弱磁性材料の切削*

鬼鞍宏猷** Günter Spur*** Gerry Byrne***

The Machining of Soft Magnetic Materials
with TiN Coated HSS Tools

Hiromichi ONIKURA, Günter SPUR and Gerry BYRNE

Soft magnetic materials find common application in electronic and electrical engineering as well as in information technology. The nickel-iron family of soft magnetic materials exhibit very poor machinability as evidenced by the extremely short tool life which arises when machining using classical tool materials. In addition cutting operations lead to a deterioration in magnetic properties of magnetically annealed components. In this article the experimental results obtained when machining MUMETALL® with TiN coated HSS and other tool materials are reported. Results of investigations into the tool wear mechanisms and surface integrity are presented and discussed for the turning, milling and drilling operations. The detailed investigation of the scatter of tool life results obtained when milling with indexable inserts is explained in terms of reproducible quality of the cutting tools coated using the PVD process.

Key words: soft magnetic materials, machinability, coated cutting tools, TiN coated HSS, surface integrity

1. 緒 言

弱磁性部品の生産においては、普通、目的の形状・寸法精度および表面粗さを得るために機械加工を行う必要がある。機械加工によって、この材料¹⁾の磁気特性は著しく劣化する可能性があり、そのような場合には機械加工後に磁気焼鈍を行わねばならない。しかし、この焼鈍は部品の生産コストをかなり増加させる。また、それは部品の変形を引き起こすために高い精度が要求されるところでは望ましくない。したがって、加工後の焼鈍を避けるためには、磁気特性の劣化が最小となるような最適条件下で機械加工を行うことが要求される。これまで、高速度鋼、被覆高速度鋼、超硬合

金、被覆超硬合金、セラミック (Si_3N_4)、多結晶 CBN および多結晶ダイヤモンド工具を使って多くの弱磁性材料の切削試験を行い、工具寿命や磁気特性に及ぼす影響などの全体的な性能の点から見て、被覆工具が最も良い結果を与えることを示した^{2)~6)}。これらの工具のうち、非常に大きなすくい角をもつことができ、切れ刃の安定性が良い TiN 被覆高速度鋼工具は、機械加工中に生じる切削領域の機械的・熱的応力が低く、しかも工具寿命が長くなるので、この材料の切削に最適であることが明らかになった。

以上の理由から、本研究では、主に TiN 被覆高速度鋼工具を用いて弱磁性材料 MUMETALL®⁺の詳細な各種切削加工実験（旋削加工、フライス加工およびドリル加工）を行い、工具摩耗特性および被削面の性状などについて調べた。後者については、表面層の金属組織、微小硬さおよび残留応力の分布を測定し、評価した。

* 原稿受付 平成元年1月19日。昭和63年度精密工学会九州支部宮崎地方講演会(昭和63年11月22日)にて発表

** 正 会 員 九州大学工学部(福岡市東区箱崎6-10-1)

*** Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Technische Universität Berlin (Pascalstrasse 8-9, 1000 Berlin 10)

+ MUMETALL®は、Vakuumschmelze 社(西ドイツ、ハーナウ)で生産されている一つの弱磁性材料の商標名である。

Fig. 1 Metallographic section of MUMETALL®

2. 弱磁性材料の成分と特性

被削材として用いた、弱磁性のニッケル-鉄系合金 MUMETALL® の化学成分は、重量パーセントで Ni: 76.5 %, Fe: 15.7 %, Cu: 4.5 % および Mo: 3.3 % である¹⁾。MUMETALL® は比較的大きな結晶粒で面心立方組織の準等方性の材料であり、図1の金属組織の写真に示すように、この型の合金に特有の双晶組織を呈する。材料の物理的特性および機械加工中の挙動はニッケルの含有量によって強く影響を受ける。焼鈍後の製造過程が磁気特性にあまり大きな影響を与えない強磁性材料と比較して、弱磁性材料は機械加工に伴う弾性変形や塑性変形の影響を受けやすい。減磁において、いわゆる“Broch wall”の変位や回転が最小エネルギー損失で起こるとき、容易に磁化されてしまう可能性がある。その領域の壁の動きは、機械加工において引き起こされる材料の結晶の変位や応力レベルによって強く影響を受ける。その材料は最初の磁気特性を失ってますます強磁性になり、ヒステリシス曲線は平坦で広くなる。機械加工が材料の磁気特性に及ぼす影響を調べるために、本研究で用いたすべての試料には実験前に最終的な焼なまし作業を施した。この焼なましは、真空炉内で1100℃に熱し、6時間保持したのち同じ炉内で500℃に徐冷し、最終的に保護ガスの雰囲気内で室温に冷却するものである。

3. 実験方法

旋削試験は、Heidenreich and Harbeck旋盤 (S 500 型, $n < 5600$ rev/min, 無段変速, 長手送り, $f = 0.007 \sim 2.0$ mm/rev, 出力 15 kW), フライス

加工試験は Deckel CNC フライス盤 (FP 4 型, 主軸回転速度 $n = 31 \sim 6300$ rev/min, 送り速度 $2 \sim 600$ mm/min) で行った。この4軸フライス盤の主軸出力は 4 kW である (各軸 2 kW)。穴加工実験は、Kolb 社製 K St 80 型 (電動機出力が 4.5 kW で12段変速, $n = 27 \sim 900$ rev/min) のボール盤を用いて、0.36 mm/rev の最大送りで行った。

加工が磁気特性に及ぼす影響についての研究は、環状の工作物に対して行った。その他の場合は、棒材 (旋削), 角材 (フライス加工) および板材 (ドリル加工) を用いた。切削力の測定には、キスラー社製3分力 (旋削およびフライス加工) および4分力 (ドリル加工) 工具動力計を使った。切削工具の摩耗は、標準的な工具顕微鏡、および特別な試験には走査型電子顕微鏡を用いて測定した。切削仕上げ面は、表面層上およびその内部への損傷の程度を明らかにするために、微小硬さ (Durimet 測定器), 残留応力 (X線回折法), 表面粗さ (Perth-O-Meter), 金属組織の性質 (万能顕微鏡および透過型電子顕微鏡) および表面形状 (走査型電子顕微鏡) の測定および評価を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 工具寿命と工具摩耗機構

旋削試験では、16の異なる切削条件で摩耗特性を調べた。逃げ面摩耗 $VB = 0.3$ mm までの切削距離は、 $v_c = 50$ m/min, $f = 0.4$ mm/rev で 4250 m であった。工具寿命は送りの減少とともに減少した。 $f = 0.1$ mm/rev で $T = 60$ min, $f = 0.4$ mm/rev で 85 min ($v_c = 50$ m/min)。図2に、送り $f = 0.2$ mm/rev で切削速度 v_c を変えたときの工具摩耗曲線を示す。 $v_c = 150$ m/min の切削速度ではほんのわずかの工具寿命しか得られていない。切削速度が減少すると工具寿命は増加する。また、曲線上の高摩耗速度への折点は逃げ面摩耗のより大きな点で起こることもわかる。 $v_c = 50$ m/min での折点は $VB = 0.3$ mm, $v_c = 70$ m/min では $VB = 0.2$ mm, $v_c = 100$ m/min では $VB = 0.12$ mm である。図3は、逃げ面摩耗 $VB = 0.3$ mm, 送り $f = 0.2$ および 0.315 mm/rev, すくい角 24° における工具寿命と切削距離のプロットを示す。近似的な直線に対する Taylor の工具寿命方程式は次のようになる。すなわち、 $f = 0.2$ mm/rev に対して、 $v_c \cdot T^{0.35} = 220$, $f = 0.315$ mm/rev で $v_c \cdot T^{0.18} = 115$

Fig. 2 Flank wear versus cutting distance when turning MUMETALL with TiN coated HSS tools

である。 k の値が -2.9 と -5.5 は、一般に被覆されていない高速度鋼工具の範囲外で、超硬合金工具の範囲にある。

MUMETALL®でのフライス加工試験では、すくい角 $\gamma_a = 34^\circ$ の TiN 被覆高速度鋼チップを使った。予備試験では、旋削加工やドリル加工に比べて非常に大き

Fig. 3 Tool life and cutting distance (to $VB=0.3$ mm) when turning MUMETALL with TiN coated HSS tools

Fig. 4 The scatter of results when face milling MUMETALL with TiN coated HSS tools

な工具寿命のばらつきが観察された。図4は対数目盛で一つのチップの4隅のそれぞれに対する逃げ面摩耗と切削距離との関係を示す。20隅(5チップ)のすべてをランダムに選び、図4に示す条件の下で工具寿命試験を行った($v_c = 88$ m/min, $f = 0.2$ mm/rev, $a_p = 1.0$ mm, $a_e = 50$ mm)。逃げ面摩耗 $VB = 0.3$ mmまでの切削距離は、同一の切削条件に対して $l_c = 500 \sim 900$ mの範囲にあることがわかった。5個のチップとも隣合って存在するコーナ(図4の場合はBとC)に対して良い結果が得られ、他の2つは工具寿命が短くなった。この場合、20個のすべてのコーナにおいて、 $VB = 0.12$ mmで摩耗速度の明らかな非常に鋭い遷移が起こった。この遷移点は、旋削の場合のように、切削速度が低下すると大きい逃げ面摩耗の点に移行する。切削工具製造業者や被覆専門業者との議論から、結果のばらつきはPVDコーティング炉内での工具の配置、一方の側への曝露が他の側へのそれよりも大きいことに起因するのではないかと考えられる。基材の研削は、すくい面側が球面となるように、そして逃げ面側はチップの各コーナに対して同じように行われるので、対角位置のコーナが同じ寿命傾向を示すことはあっても、このようなばらつきにはならないものと思われる。走査型電子顕微鏡によって新しい工具を詳細

Fig. 5 A comparison of the behavior of HSS and TiN coated HSS tools when drilling MUMETALL®

に観察してみると、基材とコーティングは非常に高い品質であるにもかかわらず、いくつかの微小欠陥が主に切れ刃領域に起こっていることがわかった。つまり、チップのそれぞれのコーナはわずかに異なる微小特性を示す。また、実験中のSEM調査から、切れ刃が工作物に食付いてから非常に短い時間の後にコーティング層が脱落することがわかった。この段階において切れ刃直下の逃げ面のコーティングは取り除かれる。一方、すくい面上のコーティングは変化しない。切れ刃は、被覆工具の最初の状態と比べて鋭利になり(すなわち、切れ刃の丸みは $5\mu\text{m}$ 以下に下がる) 工具がほとんど寿命に至るまでその鋭利さを維持する。逃げ面摩耗-切削時間曲線上の折点に至って後、VB maxの急上昇が起こり、工具損傷に至る。

穴加工実験では、被覆しない高速度鋼ドリルを用いて穴あけを行うことはかなり困難であることがわかった。そのドリルは壊滅的に損傷を起こし、切れ刃コーナの脱落が非常に急速に起こり、続いて主切れ刃に沿って逃げ面摩耗速度が高くなる⁵⁾。高速度鋼へのTiNコーティングは、非常に穴加工能力の改善になる。工具の折損は起こらず逃げ面およびすくい面摩耗速度がかなり下がり、工具寿命は飛躍的に増大する。図5に、高速度鋼とTiN被覆高速度鋼の摩耗挙動の比較を示す。

Fig. 6 Metallurgical section through a chip root produced in a quick-stop test

4.2 切りくずの形成と表面性状

MUMETALL®の切削において、切削の一次および二次せん断領域で材料の非常にきびしい変形が起こる。そのような変形は、図6に示すように、旋削急停止試験によって得られる試料の切りくずの根元の金属組織断面において見られる。切削工具のすくい面に接触している切りくず下面の変形はきわめて大きい。また三次元切削状態での表面形成に関する機構は非常に複雑である。そのプロセスの理論的解析は非常に多くの変数を含むためにあまり有効ではない⁴⁾。表面形成機構の一部の重要なものは、機械加工プロセスの相互作用である^{1) 4) 7)}。二次元切削における切削機構を簡略に図示したのが図7である。切削仕上げ面を調べると運動学的な粗さの次に、送りマークの幅の間の微小な

Fig. 7 Surface layer deformation in turning

Fig. 8 Surface roughness as a function of feed per tooth for a milled surface

形状が、表面粗さに影響を与える重要な因子の一つである。SEMによるこの形状の解析から、旋削加工、フライス加工およびドリル加工に対して多くの特徴が繰り返し起こることがわかる。

主切れ刃および副切れ刃の微小形状のために、切削方向に直角な方向および表面の送りマークの中に微小なピークが起こる。クレータは送りマークの幅の間の表面上にランダムに広がることもわかった⁴⁾。表面粗さに寄与する重要な塑性変形機構は、押し込み効果⁴⁾である。切削工具の作用切れ刃に沿って生じる微小欠陥と同様、鋭利さのために、非常に薄い層が工具の前に押され、同時に切削仕上げ面に押し込まれる。それぞれの切削仕上げ面は、切削における三次元塑性変形、すなわち材料の側方流れが存在することを示した⁴⁾。これは、送りマークの尾根に形成されているようになる。佐田⁸⁾は、側方流れが表面仕上げに及ぼす影響を研究し、この粗さの成分はぜい性材料に対しては零であるが、延性の高い材料に対しては $6 \mu\text{m}$ の高さまで寄与する可能性があることを見出した。したがって、高度に延性のある弱磁性材料 MUMETALL[®]の切削において、この塑性変形の機構は大いに表面粗さに寄与するであろう。

図8に、MUMETALL[®]をフライス加工したときの表面粗さのパラメータ R_a 、 R_p および R_z を、一刃あたりの送りに対してプロットした⁹⁾。表面粗さは、 $f_z = 0.02 \text{ mm/刃}$ の値に送りを下げると向上することがわかる。さらに送りを下げると表面粗さは劣化する。これは、特に R_p と R_z のパラメータに関して明らかで

FACE TURNING

Workpiece: MUMETALL[®]
 Tool Material: Ti(CN)-HM
 $v_c = 150 \text{ m/min}$, $f = 0.1 \text{ mm}$
 $a_p = 0.5 \text{ mm}$
 without Cutting Fluid
 Sample Preparation:
 Bollmann-Process
 Apparatus: TEM, Typ JEM100B

Fig. 9 Surface layer deformation observed by the transmission electron microscope

ある。一般に、そして他の金属材料に対する傾向と一致して、表面粗さは切削速度の増加とともに良くなり、逃げ面摩耗の増大とともに悪くなる⁴⁾。

透過型電子顕微鏡による表面層変形の観察結果を図9に示す。二つの領域を調べた。一つは切削仕上げ面下 $60 \mu\text{m}$ 、もう一つは 6 mm である。表面下 6 mm の距離においては、材料が加工の影響を受けていないことがわかる。粒界は直線であり、組織の欠陥の徴候はない。これに対して、表面下 $60 \mu\text{m}$ の結果(測定B)は、極端な塑性変形の証拠を示している。この領域で非常に高い転位密度が観測された。選択的な方向の間の 70° の角度から結晶の壁は (111) 面に平行に走っており、 (111) 面は体心立方金属材料に対する選択的すべり面であることがわかる。このようにして、切削における塑性変形は結晶学的な (111) 面上で動く多数の転位を生じさせる。磁性材料にお

る Broch wall の運動は、そのような転位によってきびしく制限されることが知られている。表面層における微小硬さの測定から、切削加工において生じる高い機械的応力のために、450 μm の深さまで、かなり微小硬さが増大した。最大の微小硬さは、表面上あるいは表面近傍で、 $HV_{0.1}=370$ となった。これは、焼鈍した MUMETALL[®] の $HV_{0.1}=150$ と比較して非常に高い。表面層の微小硬さの勾配は、切削速度と送りに相対的に無関係であることがわかった。残留応力は、二次元旋削面と穴加工面について測定した。旋削面では、引張応力が起こる。応力の大きさは、すべての切削条件において非常に高く、最小値で $\sigma_E=850\text{ N/mm}^2$ は高送りで半径方向において生じる。材料の降伏強さは $R_{eH}=140\text{ N/mm}^2$ である。穴加工面では圧縮応力となる。

5. 結 論

- (1) 被覆によって切れ刃丸みが少し増すにもかかわらず、被覆切削工具は、弱磁性材料の旋削加工、フライス加工および穴加工において最良の工具寿命を示すことがわかった。旋削加工における被覆高速度鋼工具の寿命は超硬合金工具の寿命に匹敵する。フライス加工では、切れ刃が工作物に食付いてから短時間の後にコーティング層が脱落することがわかり、工具寿命には大きなばらつきが認められた。後者の原因はコーティング過程にあるものと推定されるが、原因究明にはより詳細な研究が必要である。TiN被覆高速度鋼ドリルで穴加工するとき、被覆しない高速度鋼ドリルの最大16倍の工具寿命が得られた。
- (2) 旋削における切削急停止試験から、工作物材料のきびしい塑性変形が表面層と切削工具のすくい面に接触した切りくず下面に沿って起こる。表面層の粒子は大きく変形し、切削による変形の方に曲がる。
- (3) 高倍率の透過型電子顕微鏡により、表面層に著しい変形が起こることが明らかになった。表面から60 μm の深さにおいて高い転位密度が認められた。金属組織の観察から、粒子の変形は表面下

100 μm より深い箇所にも存在することがわかった。残留応力の測定から、引張および圧縮応力が表面層に生じ、非常に高い値になる。たとえば、二次元切削において最大 $\sigma_E=850\text{ N/mm}^2$ が測定された。切削仕上げ面層の微小硬さは表面からの距離とともにかなり変化する。部品本体の硬さの100%以上の微小硬さの上昇が測定された。切削加工後に測定された各パラメタから、切削された部品の表面上の大きく変形した層は、材料本体のものとは著しく異なる特性をもつことがわかる。

本研究に対する資金援助はドイツ研究協会 (Deutsche Forschungsgemeinschaft) により受けた。旋削とフライス加工の研究用のTiN被覆高速度鋼工具は、Alesa 社 (スイス) により提供された。TEMと残留応力の測定はベルリンの材料試験と研究のためのドイツ自由協会 (BAM) で行われた。ここに記して深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) R. Boll: Soft Magnetic Materials. Fundamentals, Alloys, Properties, Products, Applications, Vakuumschmelze GmbH, Hanau, 1977.
- 2) G. Byrne: Drehen weichmagnetischer Werkstoffe mit CVD-beschichteten Werkzeugen, Ind. Anz., 109, 78, (1987) 36.
- 3) G. Byrne: Seminar "Untersuchungen an TiN-beschichteten HSS-Wendeschneidplatten beim Fräsen von MUMETALL", Alesa Co., Tool Manufacturers, Seengen, Switzerland, 1988.
- 4) G. Spur and G. Byrne: Surface Integrity in the Machining of Soft Magnetic Materials, J. Adv. Man. Pro., 1, 2, (1986) 159.
- 5) G. Spur and G. Byrne: The Machinability of Soft Magnetic Materials, Proc. 15th NAMRC, USA, (1987) 523.
- 6) G. Spur, F. Özhan and G. Byrne: Fräsen weichmagnetischer Werkstoffe, Zwf., 80, 2, (1985) 91.
- 7) D. Gillibrand: Surface Formation during Machining, Ph. D. Thesis, University of Nottingham, England, (1975).
- 8) T. Sata: Surface Finish in Metal Cutting, Ann. CIRP, 12, 4, (1964) 190.