チタン合金とニッケル合金の高速研削のための 新しいダイヤモンド電着工具とその強制冷却システムの開発*

田 辺 郁 男^{*1}, HOANG Thang Binh^{*1}
井 山 徹 郎^{*1}, Eike KRATZ^{*2}

Development of New Electro Deposited Diamond Tool and Its Compulsory Cooling System for High Speed Grinding of Titanium and Nickel Alloys

Ikuo TANABE^{*3}, HOANG Thang Binh,
Tetsuro IYAMA and Eike KRATZ

^{*3}Central Machine Shop, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka-shi, Niigata, 940-2188 Japan

Recently titanium alloys and nickel alloys have become eminent for making aeronautic and astronautic parts. Since both nickel alloys and titanium alloys have a very small thermal conductivity, the being used tool will suffer from a huge damage by heat generated during grinding process. Therefore, there is a requirement for a durable tool with excellent cooling capacity. In this research, a new electro-deposited diamond tool for high speed grinding of nickel alloys and titanium alloys was developed and evaluated. The new tool is a cup shaped end mill, its body is made from copper (due to its superior heat conduction characteristics) and the plating layer for bonding the diamond grains # 120 is nickel. The cooling system is an advancement of the former used heat pipe. Water is supplied from outside through a thin tube, that is integrated in the tool body. Thereby the effect of water evaporation, featuring a very large cooling capacity, could be applied. The assayed materials were Ti 6 Al 4 V and Inconel 718. The grinding conditions were investigated by some pre-experiments. It is concluded from the results that; (1) The cooling capacity of the new tool using water evaporation is very effective to maintain the grinding potential of electro-deposited diamond tools, (2) The new tool is effective for high speed grinding of nickel alloys and titanium alloys, (3) The new tool and compulsory cooling system are economical and eco-friendly.

Key Words: High Speed Grinding, Titanium Alloy, Nickel Alloy, Compulsory Cooling, Tool Life

1. 緒 言

最近, チタン合金やニッケル合金は航空機材料として多用されており, 容易かつ高精度にそれらを加工する方法が検討されている^{(1), (2), (3)}. しかし, この二材料はいずれも熱伝導率が低く, 加工の際に発生した熱の多くが工具に集中的に熱伝導されるため, 工具が高温になり, 自身の硬さや機械的強度が著しく低下した状態で加工することになる. また, 工具材料としてダイヤモンドを考えると, 300℃までは硬度や機械的強度が温度上昇に依存しない材料であり, 工具先端温度300℃を限度としてチタン合金やニッケル合金の加工に有効利用できると考えられる.

一方, 著者らはボールエンドミル形状のダイヤモンド電着工具の内部にヒートパイプを構成し, 工具の内部から連続的に強制冷却することによって, 超硬を乾

式研削した場合の四倍の工具寿命で加工できることを明らかにした⁽⁴⁾.

本研究では, チタン合金やニッケル合金などの難削材を効率よく研削するために, 冷却効率のよいダイヤモンド電着工具を開発し, さらに, 先のヒートパイプ型工具よりも効率よく強制冷却するための冷却システムを開発する. 最後に, 開発した工具と強制冷却システムを用いて, 研削加工時の工具温度測定と工具寿命測定を行って, 工業的な有効性を評価する.

2. 新しいダイヤモンド電着工具とその強制冷却システムの開発

2. 1 従来のヒートパイプ内蔵ダイヤモンド電着工具の問題点

図1に著者らが先の研究⁽⁴⁾で開発したヒートパイプ内蔵のダイヤモンド電着工具の概略図を示す. これは, 従来のダイヤモンド電着工具の内部に穴を開け, 水とエタノールの混合物を冷却媒体として封入したものである. また, このヒートパイプ型ダイヤモンド電着工具はコレートチャックで保持された後, その上部には水冷層が設けられ, そこで気化熱^{(5), (6), (7)}による水冷が行われる. これにより, 超硬を

* 原稿受付 2008年5月26日.

^{*1} 正員, 長岡技術科学大学機械系(〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1).

^{*2} 長岡技術科学大学工学部.

E-mail: tanabe@mech.nagaokaut.ac.jp

乾式研削した場合の四倍の工具寿命で加工できた。

外部からの研削油剤をかけることによる強制冷却では、工具の高速回転から生じる遠心力や空気の連れ回り層があることによって、供給した研削油剤が刃先先端に十分にかからなかったり、エアーカット時のみしか研削油剤が刃先先端にかからなかった。これに対して、この工具内部にヒートパイプ機能を内蔵させて強制冷却するシステムは、連続的に強制冷却でき、電気エネルギーを使用せず、水の気化熱のみを使用しているため、作業者の健康と地球環境の保全にも貢献していた。

しかし、ダイヤモンドは熱伝導率が大きく、ヒートシンクも大きいものの、このダイヤモンドとヒートパイプ機構の間には、熱伝導率が小さい工具本体のステンレス鋼 SUS304 と電着用の鍍金材料のニッケルが存在し、あたかも断熱材の役目をして、強制冷却を阻害する大きな要因であった。また、ヒートパイプ機能を通して間接的に気化熱冷却しているために、全体の冷却効率が低下せざるを得なかった。

2. 2 冷却効率を考慮したダイヤモンド電着工具の開発

できるだけ冷却効率を上げるために、前節のダイヤモンド電着工具の本体および電着用の鍍金の材料を考察する。表 1 に選択対象として考えられる材料の熱伝導率を示す。図 2 には工具本体と電着用の鍍金にいろいろな材料を使用したときの見かけ上の熱伝導率を計算するための熱解析用 FEM モデルを示す。ダイヤモンド電着工具の集中度から計算した砥粒 1 つ当たりの工具半径方向のモデルである。4 つの側面はすべて断熱として、ダイヤモンドに熱流束を与え、工

具内壁は 0°C と $10\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ で熱伝達したときの定常熱伝導計算をする。この FEM モデルで、工具本体と電着用の鍍金をいろいろな材料の組合せにしたときのダイヤモンド表面温度と工具内壁温度の温度差に対して、モデル材質が同一と仮定して計算した温度差が同じになったとき、その均一と仮定したモデル材質の熱伝導率を見かけ上の熱伝導率とした。

図 3 に工具本体と電着用の鍍金にいろいろな材料を使用したときの見かけ上の熱伝導率の計算結果を示す。工具本体をステンレス鋼 SUS304 から銅にすることによって、ニッケル鍍金の場合は 12 倍程度、銅鍍金の場合は 20 倍程度見かけ上の熱伝導率が大きくなった。この計算で使用した工具本体と電着用の鍍金の材質の組合せの中で、工具本体と電着用の鍍金ともに銅にした場合が最も見かけ上の熱伝導率が大きくでき、つぎに大きいのは、工具本体が銅で電着用の鍍金をニッケルにした場合であった。

つぎに、工具本体に銅、電着用鍍金に銅もしくはニッケルを使用した場合の機械的強度を FEM によって考察した。図 4 に鍍金層の強度を考察するための解析用

Table 1 Thermal conductivity of each material for new electro-deposited diamond tool

Material	Thermal conductivity W/mK
Diamond (PCD)	2000
Copper	390
Aluminum	210
Nickel	43
S45C	50
SUS304	16

Fig. 1 The cooling system using the electro-deposited diamond tool with heat pipe function inside

Fig. 2 FEM model for calculation of apparent thermal conductivity regarding electro-deposited diamond tool

FEM モデルを示す。図 2 と同様の形状のモデルであり、モデルの 4 つの側面は隣接する部分とのひずみの対象

Fig. 3 Relationship between apparent thermal conductivity and combination of tool materials

Fig. 4 FEM model for calculation of mechanical strength regarding new electro-deposited diamond tool

Fig. 5 Calculation results of mechanical strength regarding new electro-deposited diamond tool

面と考え、面直角方向にローラ支持とし、工具の内壁は固定とした。ダイヤモンド砥粒には切込み量と工作物の比研削抵抗に応じて研削方向 (X 方向) に面圧をかけた。図 5 に切込み量と鍍金層の最大応力 (VonMises) の関係を示す。前の研究⁽⁴⁾で推奨される加工条件は、工作物が超硬 V10 では、切込み量が $5\mu\text{m}$ であったが、それに比べて工具本体に銅、電着用鍍金に銅もしくはニッケルを使用した場合で、 $50\mu\text{m}$ 程度の深い切込みにしても、使用している銅やニッケルの許容応力に至ることはなく、従来の一般的な電着工具 (工具本体が SUS304 か S45C で、ダイヤモンドをニッケル鍍金) を、工具本体に銅、ダイヤモンド電着用鍍金に銅もしくはニッケルに代えた場合でも、研削には十分な強度を有していると考えられる。

なお、ダイヤモンドを銅鍍金で電着することが困難であったため、本報では工具本体の銅に $0.5\mu\text{m}$ のニッケル鍍金を施した後に、ニッケル鍍金でダイヤモンド電着をした。

また、工具全体モデルでは、工作物が Inconel 718 である場合、切り込み量が $500\mu\text{m}$ であった時の研削抵抗と 50000min^{-1} 高回転による遠心力を受けても工具をコレットチャックに固定する部分の最大応力は 9.9MPa であり、銅の許容応力の 8 分の 1 に至ることはなく銅製工具を使用しても問題ないと考えられる。

2. 3 内部気化熱冷却システムの開発

前節で開発した新しいダイヤモンド電着工具の内側を効率よく強制冷却するために、内部気化熱冷却システムを開発した。図 6 にそのシステムの説明を示す。高速スピンドルユニットの上面から穴をあけ、そこに外径 2.0

Fig. 6 Schematic view of the compulsory cooling system inside the new electro-deposited diamond tool

mm (内径 1.6 mm) のステンレス製パイプを通し、そのパイプ先端がダイヤモンド電着工具の内部の底から 1.0 mm の位置になるようにセットし、パイプが電着工具の回転で連れまわられないように、パイプを高速スピンドルユニットの筐体に固定する。ステンレス製パイプのもう一端はオイルミスト装置に連結する。このオイルミスト装置には水のみを供給し、微量の水を連続的に供給する装置として使用する。

本開発の内部気化熱冷却工具は、砥粒であるダイヤモンドのヒートシンクの良さを最大限に引き出せるように、工具本体を銅として工具内壁までの良好な熱伝導経路を確保し、さらに、冷却効率を上げるためにダイレクトの気化熱冷却ができるような強制冷却システムを搭載した。

3. チタン合金とニッケル合金の加工による開発システムの評価

3. 1 評価方法 前章で開発した新しいダイヤモンド電着工具とその強制冷却システムで、チタン合金とニッケル合金の工作物を加工した際の研削特性を測定し、その有効性を評価する。表 2 に評価実験のための加工条件、図 7 に加工の様子をそれぞれ示す。開発したダイヤモンド電着工具を高速スピンドルユニットに装着し、主軸回転数を 50000 min^{-1} 、工具と工作物の接触長さ 8 mm で切込みを $1 \sim 3 \mu\text{m}$ として、1 パスあたり 50 mm の切削を往復で行った。その際の送り速度は 1250 mm/min とした。これは、切削音、振動、工具の安定性、生産性の観点から推奨できると判断した加工条件である。工作物は Ti6Al4V および Inconel 718 を使用した。

Table 2 Grinding conditions for evaluation

Tool size	$\Phi 6 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ length
Work pieces	Ti6Al4V: Hardness HRC 39, Specific grinding force 2470 MPa Inconel 718: Hardness HRC 36, Specific grinding force 3220 MPa
Work piece size	50 mm $\times$ 50 mm $\times$ 25 mm
Spindle speed	50000 min^{-1}
Grinding depth	1, 2, 3 μm
Feed speed	1250 mm/min
Contact length between tool and work piece	8 mm
Cutting distance	50 mm / 1 pass

図 8 に温度測定の設定アップを示す。温度測定には放射型温度計を使用し、ダイヤモンド電着工具がエアーカットを始める部分の温度を加工点から 300 mm 離れた所で測定した。

図 9 に工具寿命判定方法と加工量測定方法の写真を示す。図 9(a) はマイクロスコープで観察した使用前後のダイヤモンド砥粒の写真である。砥粒が平均的に右側の状態になったときを寿命と判定することにした。これとは別に、 $1 \mu\text{m}$ 精度のマイクロメータで工具の直径の減少量を測定したところ、摩耗による直径減少量が 0.085 mm になった時点で、ダイヤモンド砥粒が平均的に図 9(a) 右図のようになることが確認されたため、簡易的な工具寿命判定方法として、工具の加工部上・中・下段の各円周部 3 箇所 (120° ごと) の直径減少量の平均値が 0.085 mm になった時点を工具寿命とした。

Fig. 7 Photograph of the grinding system using new electro-deposited diamond tool and its forced cooling system

Fig. 8 Schematic view for measuring temperature on the electro-deposited diamond tool

図 9(b)では、1 パスごとに電着工具が左方向に $3\mu\text{m}$

Fig. 9 Photograph of electro-deposited diamond of both pre-grinding and after grinding and the work piece with laser mark

Fig. 10 Result of the temperature on the electro-deposited diamond tools

ずつ切り込まれ、紙面垂直方向に 50 mm 送られる。加工量測定方法は、図 9(b) に示すように、工作物側面に $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ の正方形模様を縦横 $90\mu\text{m}$ ピッチで YVO_4 マーキング用レーザーで照射し、それを目印としながら研削断面積を測定した。図では電着工具先端部分の形状が残っている。工具寿命と判定した段階で、この研削断面積 $\times 50\text{mm}$ ($=1$ パスの切削距離) を総加工量とした。

3. 2 温度測定の結果 図 10 に温度測定結果を示す。本報で開発した新しい電着工具と強制冷却システムのほかに、工具本体材料 SUS304 と強制冷却システムの場合、従来から市販されている中実の電着工具の乾式研削、先に著者らが開発⁽⁴⁾したヒートパイプ機能付き電着工具 (工具本体が SUS304) の 4 種類の電着工具を使用した。工作物は Ti6Al4V, Inconel 718 の 2 種類である。加工条件は表 2 のとおりである。切込みは $3.0\mu\text{m}$ としたときの定常状態の温度上昇結果である。なお、この加工条件における気化熱冷却のための最適な水供給量は、予備実験の結果からすべての工作物について 180 ml/h (切込みは $3.0\mu\text{m}$) とした。本報で開発した新しい電着工具と強制冷却システムは、従来の電着工具の 4 倍、ヒートパイプ機能付き電着工具に比べて 2 倍の冷却効果があった。また、工具本体材料が銅の場合は、それが SUS304 の場合に比べて 1.5 倍の冷却効果があった。工具本体を銅に代えたことにより見かけ上の熱伝導率を上げてヒートシンク特性を改善したことと、ダイレクトに気化熱冷却をしたことができ、冷却効率を上げたことにより、効果的な強制冷却が可能になった。

Fig. 11 Result of tool life test using several electro-deposited diamond tools

Fig. 12 Result of surface roughness using several electro-deposited diamond tools

3.3 工具寿命の結果 図 11 に工具寿命試験結果を示す。工具は前節と同じ 4 種類の電着工具を使用した。工作物は Ti6Al4V と Inconel 718 の 2 種類である。加工条件は表 2 のとおりで、切り込みは $3\mu\text{m}$ である。供給水量はすべての工作物について 180 ml/h とした。本報で開発した新しい電着工具と強制冷却システムは、従来の電着工具と比べて、Ti6Al4V 合金を研削の場合 146 倍に、Inconel 718 の場合 163 倍にそれぞれ工具寿命が伸びた。ヒートパイプ機能付き電着工具に比べて工具寿命が約 40 倍に伸びた。また工具本体材料を銅に代えたことにより、それが SUS304 の場合と比べて工具寿命が約 4 倍に伸びた。開発した新しい電着工具と強制冷却システムは、チタン合金やニッケル合金などの熱伝導率が低く、工具の熱負担が大きくなるために難削性が指摘されている材料に対して、十分な冷却能力があり、正常な工具寿命を維持できたと考える。

3.4 表面粗さ 図 12 に切込み量を増加させた時の工作物の表面粗さの測定結果を示す。本報で開発した新しい電着工具と強制冷却システムと、従来から市販されている中実の電着工具の 2 種類の電着工具を使用した。工作物は Ti6Al4V、Inconel 718 の 2 種類である。加工条件は表 2 のとおりである。切込み量は $1.0\mu\text{m}$ (供給水量 120 ml/h)、 $2.0\mu\text{m}$ (供給水量 150 ml/h)、 $3.0\mu\text{m}$ (供給水量 180 ml/h) である。本報で開発した

新しい電着工具と強制冷却システムで研削する時の工作物の表面粗さは従来の電着工具で研削する時の工作物の表面粗さよりよく改善できた。本報で開発した新しい電着工具と強制冷却システムは、従来の電着工具に比べて研削温度が低く、ダイヤモンド砥粒の硬度など機械的特性や切れ味が維持された状態で研削抵抗を低く抑えられたことが原因と考える。

4. 結 言

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 提案した電着工具は強制冷却能力が優れていた。
- (2) 提案した方法で電着工具の工具寿命が延命化でき、チタン合金やニッケル合金の高速研削が可能であった。
- (3) 新しい電着工具と強制冷却システムは環境に優しく、経済的な研削のツールであった。

参 考 文 献

- (1) NARUTAKI N. and YAMANE Y., High-speed machining of Inconel 718 with ceramic tools, *Annals CIRP*, 42(1), 1993, 103-106
- (2) USUKI H., SATO K., FERUYA S., High Speed Dry End Milling of Titanium Alloy with Coated Carbide Tool, *Journal of the Japan Society for Precision Engineer*, Vol. 71, No.4, 2005, 491-495
- (3) KITAGAWA T., KUBO A. and MAEKAWA K., Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn, *Wear* 202, Elsevier Science, 1997, 142-148
- (4) Tanabe I., Binh H. T., SUGAI H. and INOUE M., Cutting with Heating of Work Piece and Cooling of Tool Regarding Cemented Carbide Mould and Die, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineer, Series C*, Vol. 73, No. 727, 2007, 885-890.
- (5) Tanabe, I. and Minh T. H., Cutting with an Environment-Friendly Cooling Method Using Water Evaporation (Establishment of This Cooling Method and Calculation of the Suitable Supply Quantity of Water), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineer, Series C*, Vol. 67, No. 664, 2001, 4011-4016.
- (6) Tanabe, I. et al., Turning with Environment-Friendly Cooling Method Using Water Evaporation (2nd Report, Influence of Cutting Condition, Work Piece Material and Tip Material), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineer, Series C*, Vol. 67, No. 656, 2001, 1182-1188.
- (7) Tanabe, I. et al., Turning with Environment-Friendly Cooling Method Using Water Evaporation (1st Report, Cooling Effect of Water Evaporation and Its Applicability to Tool Tip Cooling), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineer, Series C*, Vol. 66, No. 643, 2000, 1026-1030.