セラミック工具によるインコネル 718 の高速切削 (第 2 報)*

—TiC ウィスカ強化アルミナセラミック工具の可能性—

山根 八洲男** 林 桂*** 鳴 瀧 則 彦**

High Speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools (2nd Report)
— Potentiality of TiC Whisker Reinforced Alumina Ceramic Tool —

Yasuo YAMANE, Katsura HAYASHI and Norihiko NARUTAKI

In order to cut the Ni-based super alloy Inconel 718 with high speed, a TiC whisker reinforced alumina ceramic tool was newly developed. In machining the Inconel 718, while a SiC whisker reinforced alumina ceramic tool showed a good performance in respect to notch wear at cutting speeds of up to 300 m/min, the tool had a large thermal wear at the higher cutting speeds because of its thermal instability to the Inconel 718. A TiC added alumina ceramic tool, to the contrary, indicated good wear resistance even at a cutting speed of 500 m/min because of thermal stability to the alloy, while the tool had a large notch wear at relatively low cutting speeds. Therefore, the TiC whisker reinforced alumina ceramic tool was developed for the purpose of giving advantages to both the SiC whisker and TiC added alumina ceramic tools. However, the tool had damage, mainly chipping, under heavy cutting conditions, while the tool showed good performance for the notch wear at low cutting speed. The reason of the chipping must be that TiC whiskers used in this test had large distributions in size, diameter and length.

Key words: Inconel 718, Ni-based super alloy, TiC whisker reinforced alumina ceramic tool, high speed machining, ceramic tool

1. はじめに

Ni 基の超耐熱合金は難削材として良く知られているが、この種の合金が難削性を示す理由としては、硬質の粒子あるいは相を含む、高温強度が高い、加工硬化しやすい等の物理的・機械的性質以外に、工具に溶着しやすいあるいは工具との反応性が高い等の化学的性質も大きな原因となっている。特に切削温度が高くなる高速切削では、これらの化学的性質が難削性の主因となり、この種の合金の切削を困難にしている。

従って、これら超耐熱合金の切削では工具摩耗あるいは損傷がどのような原因で生じているかを十分に把握し、被削材と工具の特性を考慮した検討を行う必要がある。

本研究は、Ni 基の超耐熱合金インコネル 718 のセラミック工具を用いた高速切削を対象としており、前報¹⁾では境界損傷の抑制について報告した。本報では、TiC 添加アルミナセラミック工具が同合金に対し安定であることから、TiC ウィスカ強化アルミナセラミック工具を試作し同工具の可能性を検討した。

2. インコネル 718 切削時の工具摩耗特性

セラミック工具を用いてインコネル 718 を切削した場合の工具損傷については多くの報告^{1)~8)}がなされているが、最も大きな問題は境界部に発生する溝状摩耗である。

図 1¹⁾に、インコネル 718 (時効処理材, HB 420) を SiC ウィスカ強化アルミナセラミック (図中 $Al_2O_3/SiCw$)、窒化けい素系セラミック (同 Si_3N_4) および TiC 添加アルミナセラミック (同 Al_2O_3/TiC) の各工具を用いて切削した場合の、横逃げ面境界摩耗幅 VN および逃げ面平行部摩耗幅 VB を示す。図より明らかなようにインコネル 718 の切削では VB に

比べ VN が大きく発達することが特徴である。ただしこの

Fig. 1 Influence of cutting speed on notch wear on the depth of cut line and side flank wear when turning Inconel 718 (HB 420)

* 原稿受付 平成 7 年 3 月 6 日
** 正 会 員 広島大学工学部 (東広島市鏡山 1-4-1)
*** 正 会 員 京セラ(株) (国分市山下町 1-4)

Temperature: 1573K, Time: 60min

Fig. 2 Line analysis and SEM photographs of diffusion couple; Inconel 718-Al₂O₃/SiCw

Temperature: 1573K, Time: 60min

Fig. 3 Line analysis and SEM photographs of diffusion couple; Inconel 718-Al₂O₃/TiC

VNは、図示のように、ある速度領域（約100 m/min, 温度換算でおよそ1000°C⁸⁾）を越えると減少する。

従って、この横逃げ面境界損傷を避けるためには、同損傷が大きくなる速度域よりも高い速度で切削を行えば良いわけであるが、あまり速度を高くすると図1に示したように、工具によっては、SiC ウィスカ強化セラミック工具や窒化けい素工具のように、再び摩耗が急増する。これは、図2¹⁾にSiC ウィスカ強化セラミック工具とインコネル718との高温下における反応実験を示すように、工具と被削材との反応性が顕著になり熱的摩耗が急増するためである。

一般に、高速切削用工具の基本的特性として被削材に対する反応性が低いことがあげられるが、この点では図3¹⁾に示すように、TiC添加アルミナ系セラミック工具、通称黒セラミック工具はインコネル718の高速切削には非常に優れていると言える。

被削材に対する反応性は基本的に工具の組成により決まることから、Al₂O₃/SiCw 工具の耐反応性を改善することは非常に困難と思われ、インコネル718の高速切削用工具としては、黒セラミック工具の耐境界損傷性をAl₂O₃/SiCw 工具並に高める

方がより有利と考えられる。

3. TiC ウィスカ強化アルミナセラミック工具

Ni 基合金切削時の境界損傷の原因については種々検討されているが、最も大きな原因の一つは被削材あるいは切りくずの工具に対する凝着・剝離であろう。従って境界損傷を低減させるには、耐凝着性、耐剝離性の双方から工具組成、組織を検討する必要がある。

セラミック工具に対するNi 基合金の凝着がどのようなメカニズムで生じているかについては明らかにされていないが、少なくとも、凝着の程度は組成に左右される⁹⁾¹⁰⁾ものと思われる。従って耐凝着性を向上させるには工具組成を含めた広範囲な検討が必要であるが、これについては次報で検討し、ここでは耐剝離性の向上を目的にウィスカ強化セラミック工具を検討した。ウィスカ強化セラミック工具は、ウィスカによるじん性の向上のみならず、図4に示すように、工具内部で支持されたウィスカによる工具表層部の耐剝離性の向上効果が期待できる。事実、窒化けい素系工具とSiC ウィスカ強化アルミナセラミック工具の抗折力あるいは破壊じん性値を比較した場合、両工具共ほとんど同程度の値を示すが、境界損傷に対してはウィスカ強化工具の方が優れた特性を示す。

表1¹¹⁾に現在知られている各種ウィスカの特性を示すが、セラミック工具の強化用として考えた場合、被削材と反応し難い、工具母材のセラミックスと同程度の強度と硬さを持つ、またウィスカの直径は母材の結晶粒の直径と同程度かそれ以下が望ましい、等の特性を持つ必要がある。耐反応性および強度・硬さの点から見れば表中Aluminum oxide ウィスカは最も優れた特性を持つと思われるが、現状では直径が大きく切削工具の強化用としては問題がある。

ところで最近、図5に示すようなTiC ウィスカがCVD法により生成された。TiCはこれまで述べているように、耐反

Fig. 4 A model of depth of cut line part at low cutting speed

Table 1 Characteristics of whiskers

Type	Dia. μm	Length μm	T. S. GPa	Y. M. GPa	Hardness Morse
Silicon carbide	0.05-7	5-200	210	4 900	9
Silicon nitride	0.1-0.6	5-200	140	3 900	9
Potassium titanate	0.1-1.5	10-100	70	2 800	4
Aluminum borate	0.5-1.0	10-30	80	4 000	7
Zinc oxide	5	2-300	100	3 500	4
Magnesium sulfate, Basic	under 10	10-100			
Magnesium oxide	2-10	100-1 000	10-80		
Magnesium potassium	under 1.0	10-100			5.5
Graphite	1.0-2.0	10-200	70-210		
Calcium sulfate	2.0	60	21	1 800	3
Aluminum oxide	110		210	4 300	9

T. S.: Tensile Strength, Y. M.: Young's Modulus

Fig. 5 SEM photographs of TiC whiskers used in this tests

応性に優れると同時に強度・硬さの点からも問題はない。なお、TiC ウィスカの直径は図示のように太いもので直径 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ となっており、SiC ウィスカ強化セラミック工具に使用されている SiC ウィスカの直径、 $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$ ⁶⁾ に比べればかなり大きい、アルミナセラミック工具のアルミナの粒径とオーダ的にはほぼ同程度である。

そこで、同 TiC ウィスカを用いて TiC ウィスカ強化アルミナセラミックスを試作した。ウィスカを添加する母材としては、予備実験の結果から 80% Al_2O_3 -10% TiN-10% NiO (いずれも vol%) とし、ウィスカ添加後、2 023 K, 50 MPa でホットプレスにより焼結した。

図 6 に TiC ウィスカの添加量に対する破壊じん性値 K_{Ic} の値を示す。同図には比較として SiC ウィスカ強化アルミナセラミックスの結果も示した。なお、SiC ウィスカ強化セラミックスは市販の工具用セラミックではなく、添加量に対する破壊じん性値 K_{Ic} の値を測定するために比較として焼結した物である。

図よりいずれのセラミックスもウィスカ添加量 40% で、 K_{Ic} が最大値を示し、TiC ウィスカ添加ではほぼ 7 に達することがわかる。なお、 $K_{Ic}=7$ の値は一般に市販されている窒化けい素系工具や SiC ウィスカ強化セラミック工具の値とほぼ同程度である。そこで、以後の切削実験では TiC ウィスカを 40% 含む焼結体を工具として用いた (以後 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCw}$)。なお工具では、破壊じん性値以外の抗折力や硬さなどの機械的特性も改善するため、母材の組成は上述の 80% Al_2O_3 -10% TiN-10% NiO とは若干異なったものとなっている。

Fig. 6 Fracture toughness of whisker reinforced alumina ceramics

4. 実験結果および考察

図 7 に TiC ウィスカ強化セラミック工具でインコネル 718 の時効処理材 (HB 420) を切削速度 $60\sim 300\ \text{m/min}$ で湿式長手旋削した場合の、横逃げ面境界摩耗幅 VN および逃げ面平行部摩耗幅 VB を示す。切込みおよび送りはそれぞれ $0.5\ \text{mm}$ および $0.19\ \text{mm/rev}$ である。なお、実験はそれぞれの条件で 5 回を行い、各摩耗の平均値を丸印、ばらつき (最大値および最小値) を平均値から上下に伸ばした線で示した。

同図と図 1 を比較すると、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCw}$ 工具は、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ はもちろん $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCw}$ に比べても、 $100\ \text{m/min}$ 付近 (VN が大きく発達する速度) で VN の絶対値およびばらつきとも小さく、優れた特性を示すことがわかる。なお $300\ \text{m/min}$ の高速切削では VN のみならず VB にもばらつきが現れた。

図 8 に工具摩耗形態の一例を示す。 $100\ \text{m/min}$ では $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 工具はすくい面が大きく剝離し、横逃げ面にも大きく発達した境界摩耗が見られる。また $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCw}$ 工具では、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 工具のような大きな損傷は見られないが、横逃げ面およびすくい面に顕著な境界摩耗が発達している。これに対し $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCw}$ 工具は横逃げ面境界摩耗も非常に小さく、また平行部摩耗も前二者の工具に比べ小さい。

Fig. 7 Influence of cutting speed on notch wear VN and flank wear VB when machining Inconel 718 (HB 420) with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCw}$ tool

Fig. 8 Tool wear patterns of ceramic tools tested after machining Inconel 718 (HB 420)

一方、切削速度が 300 m/min になると、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ や $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCw}$ では、横逃げ面境界摩耗が小さくなり安定してくるのに対し、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCw}$ では切れ刃全体に欠損が見られる。なおこの欠損は $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 工具の 100 m/min で見られるような大規模な欠損とは様子が異なり、その形態から、小規模な欠損（チッピング）が繰り返し生じた結果の損傷あるいは刃先の強度不足による圧壊と思われる。

そこで、実験に用いた各工具の抗折力値を測定した。試験は実験に使用した 120408 形工具から 3 mm×3 mm×12.7 mm の試験片を切り出し、各面を研削仕上げした後、支点間 10 mm の 3 点曲げとした。図 9 に各工具の抗折力値を示す。図より $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCw}$ 工具の抗折力値は他の工具よりもむしろ高いことがわかる。また、硬さも $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCw}$ 工具は HV で約 2000 程度（196 N 負荷）あり、他の工具と比べ遜色は見られなかつ

Fig. 9 Cumulative probabilities of transverse-rupture strength of ceramic tools tested

た。したがって、この欠損あるいは圧壊の原因は現在のところ不明である。

しかし、高速域で損傷が生じやすいことを考えると工具の耐熱性（高温下における機械的強度の低下）と、使用した TiC ウィスカの形状に問題が有ると考えられる。実験に使用した TiC ウィスカには、ウィスカの定義（断面積が $8 \times 10^{-5} \text{ in}^2$ 以下で、長さが断面の平均直径の 10 倍以上の単結晶）からするとウィスカとは呼べない短い物も含まれていた。ウィスカ径（2~3 μm ）を考慮に入れると、このような短い結晶は、微細なマトリクス（マトリクスの粒径 $\leq 1 \mu\text{m}$ ）中に存在している粗大な（体積で 4~9 倍）結晶と見なすことができ、刃先にこのような結晶が表れている場合脱落しやすい可能性がある。

従って、今後の課題としては、ウィスカ径をできるだけ小さくすることも必要であるが、それ以上に短いウィスカを少なくし、ウィスカの径および長さをそろえるあるいは適正な分布とすることが必要と思われる。なお、TiC ウィスカの直径が SiC のそれに比べ大きくなりやすい原因としては、SiC は六方晶であるためウィスカを作る場合一方に成長させやすいのに対し、TiC では正方晶であるため一方に成長させることが SiC に比べ困難なことに起因している。

しかしながら、100 m/min の結果を考えると、TiC ウィスカによるアルミナセラミックの強化は、切削工具の強化法としては大きな可能性を持つと言え、今後のウィスカの改善に期待したい。

5. 結 論

Ni 基の超耐熱合金インコネル 718 を高速切削するためのセラミック工具として TiC ウィスカ強化アルミナセラミック工具を試作した。試作した工具でインコネル 718 を切削したところ、100 m/min 程度の境界摩耗が大きく発達する切削速度域では、従来の TiC 添加アルミナセラミック工具に比べ境界摩耗が大きく減少し、市販の SiC ウィスカ強化アルミナセラミック工具とほぼ同程度の耐摩耗性を示したが、300 m/min の高速では刃先にチッピングあるいは圧壊と思われる損傷を生じた。

この原因としてはウィスカの形状、特に短いウィスカが問題であり、今後の課題としてはウィスカ形状の制御が重要であると思われる。

謝 辞

本実験はTiC ウィスカなしでは遂行できなかったものであり、同ウィスカの製造および提供に快く応じて頂いた、セントラル硝子株式会社に深く感謝申し上げます。なお、本実験の一部は平成6年度科学研究費補助金（一般B）の助成を受けて行われたことを付記し、関係各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 山根八洲男, 天野直宏, 林 桂, 鳴瀧則彦: セラミック工具によるインコネル 718 の高速切削——境界摩耗の抑制, 精密工学会誌, **59**, 11 (1993) 1815.
- 2) B. M. Kramer and P. D. Hartung: Theoretical Considerations in the Machining of Nickel-based Alloys, Proc. Int. Conf. on Cutting Tool Materials, Am. Soc. Metals, (1981) 57.
- 3) J. Vigneau and J. J. Boulanger: Behavior of Ceramic Tools during the Machining of Nickel Alloys, Ann. CIRP, **31**, 1, (1982) 35.
- 4) H. Winkler: Einsatz von keramischen Schneidstoffen beim Drehen von Inconel 718, Ind. Anz., **105**, 35, (1983) 45.
- 5) S.K. Bhattacharyya, A. Lawaid, M. H. Lewis and J. Wallbank: Wear Mechanisms of Sialon Ceramic Tool when Machining Nickel-based Materials, Met. Technol., **10**, 12, (1983) 482.
- 6) J. Vigneau, P. Bordel and A. Leonard: Influence of the Microstructure of the Composite Ceramic Tools on Their Performance when Machining Nickel Alloys, Ann. CIRP, **36**, 1, (1987) 13.
- 7) M. C. Shaw, A. L. Thurman and H. J. Ahlgren: A Plasticity Problem Involving Plane Strain and Plane Stress Simultaneously: Groove Formation in the Machining of High Temperature Alloys, Trans. ASME, Ser. B, **88**, (1966) 142.
- 8) N. Narutaki, Y. Yamane, K. Hayashi and T. Kitagawa: High-speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools, Ann. CIRP **42**, 1, (1993) 103.
- 9) 飯島 昇, 竹山秀彦, 山本幸弘: 切削工具の凝着機構の微視的解析と欠損防止法, 精密工学会誌, **52**, 8 (1986) 1335.
- 10) 竹山秀彦, 飯島 昇: 耐熱合金の難削特性と工具材の適応性に関する研究, 精密工学会誌, **55**, 8 (1989) 1481.
- 11) 竹中 稔: 特集ウィスカの可能性をさぐる, 本格市場を形成するか開発の動向と用途開発の現状, ニューセラミックス, **3**, 5 (1990) 43.