Ni 基耐熱合金の高速旋削加工における工具損傷と被削材の面性状

Tool Wear and Surface Characteristics in High Speed Turning of Inconel 718

○正 千原健太郎・住友電工
Kentaro CHIHARA,
Sumitomo Electric Industries, LTD.

原田高志・住友電工
Takashi HARADA,
Sumitomo Electric Industries, LTD.

久木野暁・住友電工
Satoru KUKINO,
Sumitomo Electric Industries, LTD.

High-efficiency and high-precision machining technique of the Ni-based heat resistant alloy like Inconel 718 is important concern in the aviation industry. The study deals with the turning of Inconel 718 with SiAlON ceramics and polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) tools in the cutting speed range from 200 to 400 m/min. The PCBN tool, which is made of cBN and new ceramic binder, have long tool-life with good surface integrity compared with SiAlON ceramics and conventional PCBN, because of the advantage in terms of its mechanical properties and low-affinity to heat resistant alloy.

Key Words: Heat Resistant Alloy, PCBN Tool, SiAlON, Frank Wear, Surface Roughness

1. 緒言

近年、省エネルギー化を指向した新型航空機への需要の高まりから、航空機用ジェットエンジンに用いられるインコネル 718 などの Ni 基耐熱合金素材を高効率かつ高品質に切削する加工技術の開発が望まれている。インコネル 718 は、高温硬度が高く加工硬化性が高いために工具横切れ刃部に異常摩耗(境界損傷)が生じやすく、また、工具材料との親和性が高いために工具摩耗が発達しやすい難削材料であり、超硬工具を用いた旋削加工の切削速度 V_c は 50 ~ 100 m/min に留まっている。境界損傷を生じにくい工具材料として、窒化ケイ素(Si_3N_4)に酸素とアルミニウムが固溶したサイアロン(SiAlON)セラミックスや、硬質な cBN 粒子を各種結合材と焼結した多結晶 cBN 焼結体 (以降、PCBN と略記)により、 $V_c \sim 200$ m/min での耐熱合金の旋削加工が可能である^[1]。本研究では、インコネル 718 の仕上旋削加工における能率向上を目的に、高速条件(200 ~ 400 m/min)での SiAlON セラミックス、および、PCBN 工具の損傷形態と被削材の面性状を調査し、耐熱合金の高速旋削加工に適した工具材料の検討を行った。

2. SiAlON セラミックスと既存 PCBN の比較

2-1. 実験条件

まず、Table 1 に示す SiAlON セラミックス、および、既存 PCBN の損傷形態の比較を行った。SiAlON セラミックスは、 β -SiAlON 粒子の含有率が 90 vol.% で、 Y_2O_3 系ガラスにより結合されている。既存 PCBN は cBN 粒子を、Co 基合金により結合したものである。既存 PCBN は、SiAlON セラミックスに対し 2 倍以上の硬度を有し、靱性と強度にも優れている。

切削試験では、スペシャルメタル社製のインコネル 718 (主成分：53.6 mass% Ni – 18.6% Cr – 17.7% Fe – 5.1% Nb) の外径旋削加工を行った。被削材は外径 $\phi 120$ mm × 長さ 250 mm の円柱形状で、固溶化熱処理後に時効硬化処理 (720°C で 8 時間保

持後、620°C まで冷却し 8 時間保持後空冷) を行い、硬度が HRC = 42 程度に上昇したものをを用いた。切削条件は、切削速度 $V_c = 400$ m/min、切込み量 $a_p = 0.3$ mm、送り量 $f = 0.2$ mm/rev、Wet とした。工具形状は、DNGA150412 型のロウ付け型(超硬台金)チップであり、刃先処理として 0.06 mm $\times$ 20° のチャフアーを設けた。切削油には、エマルジョンタイプを 10 倍に希釈したものをを用いた。

2-2 既存工具の損傷メカニズム

Fig. 1 に、切削距離 $L = 0.3$ km 時点(逃げ面摩耗量 $V_{Bmax} > 200 \mu\text{m}$) の工具逃げ面の SEM 写真を示す。SiAlON セラミックスは、凝着(白色部分)は少ないものの、筋状の起伏が観察された。このような筋状摩耗は被削材の仕上面品位の低下を招く懸念があり、抑制が必要である。一方で、高硬度な既存 PCBN の摩耗形態は平滑であるものの凝着が多く、高速で被削材との反応が加速度的に生じることが示唆された。これは既存 PCBN に含まれる cBN 粒子や Co 基の結合材が、インコネルと反応したためと考えられる。

(a) SiAlON Ceramics (b) Conventional PCBN
Fig. 1, SEM micrographs of wear part of the tools when turning Inconel 718 at 400 m/min ($L = 0.3$ km)

上記の結果より、SiAlON セラミックスは耐凝着性に優れ、また、既存 PCBN 工具は摩耗が発達しても、摩耗が平滑に維持される長所をそれぞれ有していることがわかった。

3. 耐熱合金用新工具材料の開発

3-1. 耐摩耗性向上の検討

耐熱合金の高効率切削加工の実現に向け、本研究では機械的性質(硬度、靱性等)に優れる cBN と、熱的性質(耐反応性)に優れる SiAlON の複合化による新工具材料の創出を目指した。基礎検討として、結合材を加えずにそれぞれ cBN 粉末、SiAlON 粉末を焼結したバインダレス焼結体(以降、BL と略記)の機械的性質と切削性能を評価したところ、難焼結材料である SiAlON は Table 2 に示す様に靱性が低く筋状摩耗が生

Table 1, Specifications of insert materials

Material	SiAlON Ceramics	Conventional PCBN
Main material	β -SiAlON	cBN
Content (vol.%)	~ 90	80 $\sim$ 90
Binder	Y_2O_3 -based glass	Co-alloy
Vickers Hardness H_V (GPa)	15	40
Fracture Toughness K_{IC} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	4 $\sim$ 5	7 $\sim$ 8
Transverse Rupture Strength (GPa)	0.8	1.7

ずるという課題があった。そこで、窒化ケイ素への添加により焼結性が向上する TiN^[2]に着目し、SiAlON と TiN の複合化を試みた。試作した複合セラミックスは、靱性が向上し、筋状摩耗も抑制されることを確認した。

新 PCBN では、既存 PCBN よりも cBN 含有率を低減させ、この複合セラミックスを結合材として用いることで、耐摩耗性が大きく向上した。Table 3 に、耐熱合金用の新 PCBN の特性を示す。新 PCBN は、SiAlON セラミックスと既存 PCBN の中間的な硬度と靱性を有する。TEM 分析の結果、結合材中の SiAlON に Ti が均一に分布していたことから、TiN との複合化により SiAlON が固溶強化されたことが推定された。

Table 2, Specifications of nitride materials

Material	BL-cBN	BL-SiAlON	BL-TiN	SiAlON +TiN
H _V (GPa)	50	18	23	21
K _{IC} (MPa·m ^{1/2})	7 ~ 10	3 ~ 4	2 ~ 3	4 ~ 5
V _{Bmax} (μm) *	159	218	345	153
Damage morphology*	Normal wear	Striated wear	Notch wear, Chipping	Normal wear

* V_C = 200 m/min, ap = 0.1 mm, f = 0.05 mm/rev, Wet, L = 0.5 km,

Table 3, specifications of novel PCBN

New PCBN	Main material	Content (vol. %)	Binder	H _V (GPa)	K _{IC} (MPa·m ^{1/2})	TRS (GPa)
	cBN	60 ~ 70	SiAlON+TiN Composite	30	5 ~ 6	1.5

3-2. 新 PCBN の切削性能と仕上面性状

Fig. 2 に、切削速度 V_C = 400 m/min における切削距離と工具逃げ面の最大摩耗量 V_{Bmax} を示す。新 PCBN は L = 1km まで V_{Bmax} = 200 μm を超える摩耗は生じなかった。Fig. 3 に、L = 1km 時点での新 PCBN の逃げ面の SEM 像を示す。新 PCBN は、SiAlON セラミックスよりも凝着が少なく、かつ、逃げ面の摩耗も比較的平滑であり、狙い通り SiAlON と PCBN の長所が両立できたことが確認できた。Fig. 4 は、V_{Bmax} = 200 μm を基準とした場合の V_C = 200 ~ 400 m/min での工具寿命(切削距離)である。本実験条件では、工具の寿命要因は全て逃げ面の正常摩耗によるものであり、全速度領域で新 PCBN が耐摩耗性に優れていることが確認された。

Fig. 5 に、V_C = 400 m/min で各工具により切削を行った被削材の表面粗さ曲線を示す。逃げ面の摩耗箇所には筋状の起伏が生じる SiAlON セラミックスは被削材表面に白濁が生じ、理論面粗さ(4.2μm)を大きく超えた最大粗さ Rz を示した。摩耗が比較的平滑であった既存 PCBN は摩耗が発達しても最大粗さが増加することにはなかった。さらに、新 PCBN は摩耗が発達した L = 1km でも粗さ曲線が乱れることなく、良好

Fig. 2, Relationship between cutting length and flank wear width at 400 m/min

Fig. 3, SEM micrograph of wear part of the new PCBN (V_C = 400 m/min, L = 1km)

Fig. 4, V_C - T_L curves for Inconel 718

(a) SiAlON Ceramics, L = 0.3 km, (b) Conventional PCBN, L = 0.3 km,

(c) New PCBN, L = 0.3 km, (d) New PCBN, L = 1km

Fig. 5, Surface roughness profiles when turning Inconel 718 at 400 m/min

な仕上面品位(光沢)が得られた。このように、結合材に TiN と SiAlON の複合セラミックスを用いた新 PCBN は、SiAlON セラミックスの有する良好な耐反応性と、cBN 粒子の優れた機械的性質を兼ね備えることで、耐熱合金の高速旋削加工に適した切削性能を有していることが示された。

4. まとめ

インコネル718の高速切削に伴う SiAlON セラミックスと PCBN 工具の損傷形態と仕上面性状について調査し、以下に示す知見を得た。

- 1) 切削速度 400 m/min において、SiAlON セラミックスには筋状の摩耗が形成され、既存 PCBN には凝着が生じた。
- 2) TiN との複合化で靱性を強化した SiAlON 結合材を添加した新開発 PCBN は、凝着が少なく摩耗面が平滑であり、良好な耐摩耗性を示した。
- 3) PCBN 工具は摩耗が発達しても良好な仕上面品位を維持していた。

参考文献：

- 1) 千原健太郎, 綿谷研一, 久木野暁, 日本機械学会 第9回生産加工・工作機械部門講演会概要集, pp. 257-258 (2012)
- 2) 時代を拓くナイドライドセラミックス, TIC出版, pp. 165-172 (2001)