溶射皮膜の機械加工に関する研究 (第1報)*

——CBN 工具による Ni-Cr 系自溶合金の切削現象について——

乾 保 之** 速 水 尚** 生 田 稔 郎**

Study on the Machining of Thermal-sprayed Coatings (1st Report)

- On the Cutting of a Ni-Cr Self-fluxing Alloy
by CBN Tools -

Yasuyuki INUI, Takashi HAYAMI and Toshiro IKUTA

This paper discusses the machinability of a self-fluxing alloy applied by thermal-spraying to machine parts based on observations of the cutting force and the finished surface. Cutting of this material is difficult using carbide tools, but possible with cubic boron nitride (CBN) tools. A large cutting force was applied to the tangential component of the three component forces. The surface roughness was fine, the roughness curve was stabilized, and a result approaching a theoretical value was obtained. However, microprotrusions of Ni particles, cleavage and plasticized flow were seen on the cut cross section. The best tools for cutting this self-fluxing alloy were CBN tools with high CBN content and the oxidized bonding agents.

Key words: cutting, self-fluxing alloy, thermal spraying, CBN tool, cutting force, surface roughness

1. 緒 言

近年、溶射技術の向上に伴って、溶射は単なる防食、補修肉盛といった分野にとどまらず、耐熱、耐摩耗性の要求される機械部品への表面処理法として積極的に採用されるようになってきた。中でも各種のNi-Cr系自溶合金溶射皮膜は溶射後に再溶融処理を施すことによって、基材と皮膜との密着性を向上させることができる。さらに、溶射皮膜の欠点とされている気孔、酸化物などが除去され、緻密な金属組織が得られる¹⁾。したがって、表面処理法としての応用範囲が非常に拡大されている。しかし、この皮膜はNiのマトリクス中にCrが粒状で点在して、部分的に硬さが大きく異なる。また、これらの粒状介在物が原因して、自溶合金溶射

皮膜の機械加工は非常に困難であり、ほとんどが研削加工に頼っているのが現状である。したがって、研削加工ほどの加工精度が必要とされない部分については、生産性の向上をはかるためにも切削への転換が望まれている。しかし、これらに関連した研究報告はほとんど見あたらない²⁾³⁾。

本報では、Ni-Cr系自溶合金溶射皮膜の切削現象を明らかにするために、手始めとしてCBN配合割合、結合材および刃先先端のホーニング角などを变化させた数種のCBN工具を用いて切削実験を行い、切削抵抗の変化ならびに切削仕上面の状態などからCBN工具による溶射皮膜の被削性を検討した。

2. 実験装置および方法

切削実験は旋盤による丸棒被削材の乾式外丸切削方式で行った。被削材は炭素鋼丸棒(S35C)の表面にNi-Cr系自溶合金を溶射被覆したものを用いた。以後Ni-Cr系自溶合金を単に自溶合金と称する。皮膜の化学成

* 原稿受付 平成元年7月31日。昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和61年3月28日)にて発表

** 正会員 近畿大学理工学部(東大阪市小若江3-4-1)

Table 1 Chemical conditions and workpiece hardness

Workpiece	Self-fluxing alloy (16CR)							
Chemical composition %	Ni	Cr	B	Si	Fe	Mo	Cu	C
	67	16	4	4	2.5	3	3	0.5
Microvickers hardness (200g)	HV 750 - 1200							
Shape and size	Diameter: 60 mm, Length: 300 mm Thickness of sprayed layer: from 1.0 to 1.5 mm Substrate: S45C							
Fused temperature	1450 K							

分および硬さは表1に示す。なお、基材側の溶射下地処理は平均粒径 200 μ mの酸化アルミナ系砥粒でブラスティングした。溶射はガス粉末溶射法（溶射ガスは酸素-アセチレン）を用いて行い、溶射後1450Kに加熱して再溶融処理した。溶射によって形成された皮膜の構造は、溶融された粒子が燃焼ガス圧によって加速されて基材表面に積み重ねられたもので、複雑な形状の基材表面にも容易に皮膜を形成させることができる。通常、溶射したままの状態では気孔率が高く、酸化物の混入等により組織的に不安定である。さらに、基材との密着性が悪いなどの欠点がある。しかし、自溶合金は溶射後に再溶融処理を施すことによって、気孔の除去、皮膜構造の密化がはかれる。さらに、基材と皮膜との境界層に合金層を形成させて、密着性を向上させることができる。したがって、皮膜の機械的性質を飛躍的に向上させることができる。しかし、この皮膜構造はNiのマトリクス中にCrが粒状で点在し、一般の合金に比べて添加元素の分散が悪く、部分的に大きく固まって介在している。溶射皮膜の表面組織は図1に示す。

Fig.1 Workpiece surface

実験に用いたCBN工具の諸条件は表2 a)に示す。結合材としては炭化物系<Aタイプ>、酸化物系<Bタイプ>およびメタル・炭化物系<Cタイプ>セラミックスの3種類を用いた。それぞれのCBN配合割合は20~80 wt%の範囲で変化させた。工具形状は33-3型のスロアウエイタイプで、チップ先端の形状はコーナ半径を0.8 mm、切れ刃には幅0.1mmのホーニングを施し、ホーニ

Table 2 Experimental conditions

a) Cutting tools

CBN tools	Types of bonding agent
	<CBN-A> carbide-nitride system
	<CBN-B> oxidation system
Carbide tools	<CBN-C> metal carbide system
	CBN content : 20, 40, 60, 80 wt %
	Honed edge angle αh : 10°, 15°, 25°, 40°
Carbide tools	K10, P20
	Honed edge angle αh : 25°
Tool shape: -5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8	
Honed edge width b: 0.1 mm	

b) Cutting conditions

Cutting speed V:	from 20 to 95 m/min
Depth of cut a:	from 0.05 to 0.5 mm
Feed S:	0.075 mm/rev

ング角 αh は10~35°の範囲で変化させた。なお、CBN工具の表示はCBN-〈結合材〉(CBN配合割合, αh)で表示する。切削実験装置と切削条件は表2 b)に示す。

切削抵抗の3分力(主分力: F_t , 送り分力: F_f , 背分力: F_p)は旋盤の送り台上に取り付けられた切削工具動力計によって検出し、その値はペンレコーダで記録し測定した。表面粗さは触針式の表面粗さ測定機によって、送り方向について測定した。さらに、仕上面の微細な破壊構造は走査型電子顕微鏡によって観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 切削切残し量に及ぼす影響

自溶合金溶射皮膜面の CBN工具による被削性の良否を検討するために、超硬合金工具(K10)とCBN工具を用いて皮膜面を切削した時の切削切残し量に及ぼす影響について比較した。その結果の一例を図2に示す。ここで示す切削切残し量は切削前後の被削材を表面粗さ測定機によって送り方向に測定して得られた断面の形状曲線である。切削はあらかじめ図中の二点破線で示すような段差を前加工用の工具によって成形し、その段差を設定切込みとして、長手方向におよそ5mm切削した。K10による切削切残し量は、被削材への工具の食付きの悪さから生じる機械系の逃げ(工具、工具動力計の弾性変形)と工具前逃げ面の急激な摩耗の進行とによって、切削開始点から実際の切込み量が著しく減少している。そのために、設定した切込み通りの切削ができずに、大きな切残しが生じている。この現象は切込み量が増す程大きくなり、高切込みによる長時間の切削はほとんど不可能であることを示している。それに反して、CBN工具(CBN-B(60%, 25°))で切削し

$\alpha_h = 25^\circ, V = 60 \text{ m/min}, S = 0.075 \text{ mm/rev}$
Fig.2 Examples of workpiece profiles after cutting

た場合、 $a = 0.36 \text{ mm}$ においても設定切込みに対する切残し量の割合が数%以下である。また、 $a = 0.07 \text{ mm}$ の低切込みではほとんど切残しが認められない。CBN工具の結合材による変化はほとんど見られず、同様の傾向を示していた。これは工作機械、工具動力計、被削材などの機械系の剛性に大きく左右される。しかし、これらの結果からみれば、CBN工具が自溶合金溶射皮膜の切削に対し大変良好な特性を示すことがわかる。

3.2 切削抵抗の3分力の変化

切削抵抗は被削性のすべての項目に直接、間接的に影響を及ぼすために、切削現象を知る上で大変重要な項目とされている。ここではCBN工具を用いて自溶合金の切削を行い、切削抵抗の3分力(F_v, F_r, F_p)に及ぼすCBN配合割合およびホーニング角の影響について検討した。なお、切削抵抗は工具摩耗の影響を受けるために、実験で用いたCBN工具は再研磨後およそ30s間のならし切削を行った後のもので、切削実験した通算の切削時間は2min以内にとどめた。

図3は切削時間の経過に伴う工具の前逃げ面摩耗幅VBと切削抵抗の3分力の変化を示したものである。なお、工具はCBN-B(60%)とし、刃先部分は1200番のダイ

Tool: CBN-B(60%), $\alpha_h = 25^\circ, V = 60 \text{ m/min}, a = 0.15 \text{ mm}, S = 0.075 \text{ mm/rev}$

Fig.3 Relationship between cutting time, average flank wear and cutting force

ヤモンド砥石により研削仕上げした。自溶合金溶射皮膜を切削した場合の工具の摩耗は、工具先端にホーニングを施している上に切削時の切込み深さが小さいためにすくい面側よりも逃げ面側に大きく発達する。とくに研削仕上げ後の工具で切削を始めると、逃げ面側に急速な摩耗の増加が認められる。しかし、その進行はおおよそ30sまでの切削初期に著しく、それ以後の増加割合は非常に少なくなり、定常状態に入る。これは切削条件のほか工具の結合材、CBN配合割合によっても異なり、直接切削抵抗にも大きな影響を与える。

切削時間の経過に伴う切削抵抗の3分力は摩耗の増加とともにわずかに上昇し、工具摩耗の安定する30s付近で増加割合が減少する。この材料は硬さが高いこともあって、切込みが大きく取れない。また、工具が材料に食い込みにくいこともあって、3分力の中でとくに F_r の値が大きく、摩耗の影響を大きく受ける。

図4は酸化物系の結合材でCBN配合割合を20%から80%まで変化させたCBN工具を用いて、同一の切削条件で切削した場合の工具前逃げ面の摩耗幅VBと切削抵抗の関係を示したものである。なお、切削時間が約60sの場合の値について比較している。同一切削時間におけるVBはCBNの配合割合が少ないものほど大きな値を示す。VBに対応した切削抵抗の値は、VBが大きくなるほど大きくなる。とくに、切削抵抗の3分力のなかで F_r に与える影響が大きく、 F_v, F_r は緩やかな増加を示すもの

Tool: CBN-B, $\alpha h = 25^\circ$, $T = 60s$, $V = 60m/min$,
 $a = 0.15 mm$, $S = 0.075 mm/rev$

Fig.4 Relationship between cutting force and average flank wear

の際だった変化はみられない。ここでは20%の工具を除いて大差が認められない。中でも、80%の場合の F_p はVB量が大きいにもかかわらず60%よりも低い値を示すなど、工具の摩耗状態のみならず工具の材質も大きく影響している。したがって、工具形状を一定とした場合の切削抵抗の比較は困難である。本実験では通常切削状態を想定して、それぞれの条件で比較的摩耗が定常な状態に入ってからで切削実験し比較することとした。

図5は切削抵抗の3分力と切削速度Vの関係をそれぞれの工具について、切込み $a=0.05, 0.1, 0.25 (mm)$ と変化した場合について示したものである。CBN工具で切削した時の3分力の変動は少なく安定しており、その平均値は切削速度の増加に伴って減少する傾向に

(-●- $a=0.25mm$, -◐- $a=0.15mm$, -○- $a=0.05mm$)

$\alpha h = 25^\circ$, $S = 0.075 mm/rev$

Fig.5 Relationship between cutting force and cutting speed

あり、切込みが変化してもこの傾向は類似している。また、3分力の中でも F_p の値が極端に高くなる傾向がある。これは被削材の硬さが高い上に、刃先切れ刃部分のホーニングによる実際すくい角の増大、初期摩耗による切れ刃先端部分の劣化、付着物などが起因して、被削材への食込みが悪くなるためである。

CBN 工具の結合材を変化させた時の3分力への影響は、 F_v , F_r には大差が見られないが、 F_p にその影響が大きく現れる。また、3分力はA, C, Bタイプの順に減少する傾向にある。

図6はBタイプの結合材でCBN配合割合を20~80%の範囲で変化させて製作した CBN工具を用いて自溶合金を切削した時の F_p の変化を示している。 F_p はCBN配合割合の増加に伴って減少する傾向があり、切込みを大きくした場合の切削において、その傾向が著しい。また、 F_p に比べて F_r と F_v の減少量の方が大きい。

図7は CBN配合割合が60%で工具先端のホーニング角度 αh を $10 \sim 35^\circ$ の範囲で変化させて切削した時の F_p の変化を示している。 F_p は、当然のことながら αh が大きくなるに伴って増加する。しかし、 $15 \sim 25^\circ$ の範囲でその増加傾向は緩やかになり、ほぼ一定値を示す。しかし、 25° 以上で再び増加する傾向がある。

Tool: CBN-B, $\alpha h = 20^\circ$, $V = 60 m/min$, $S = 0.075 mm/rev$

Fig.6 Relationship between cutting force F_p and CBN content of CBN tools

Tool: CBN-B(60%), $V = 60 m/min$, $S = 0.075 mm/rev$

Fig.7 Relationship between cutting force F_p and honed edge angle

自溶合金を切削した場合の工具材種が切削抵抗に及ぼす影響は切削初期に発生する急激な工具前逃げ面摩耗による工具先端形状の変化のほかに、結合材、CBN配合割合などの相違によって被削材金属の工具面への付着が考えられる。CBN工具の摩耗形態はCBN粒子の摩滅によるよりも、それを保持している結合材部分の被削材による選択的な摩耗がCBN粒子の脱落をまねき、摩耗が進行する。したがって、摩耗面には微小な凹凸が発生する。この凹部に金属が埋め込まれ、積み重ねられて工具面を覆う場合もある。したがって、CBN配合割合の少ない場合には付着量も多くなり、切削抵抗の増加を助長する結果となる。

そこで結合材の異なる CBN工具の前逃げ面摩耗部分をEPMAによりに分析し、付着金属の状態を観察した。その結果を図8に示す。Bタイプでは凹部分に少量のNiが部分的な埋め込まれている様子が見られる。しかし、A、Cタイプの工具では刃先ホーニング部分から前逃げ面にかけて大量のNiの付着が観察される。したがって、切削中に前逃げ面摩耗部と被削材の間に付着金属が介在する結果となるために、工具の被削材への食込みが通常よりも悪くなり、切削抵抗を増加させる要因となる。切削抵抗は付着量の多いA、Bタイプ、またCBN配合割合の少ないものほど大きな値を示す。

3.3 切削表面粗さの変化

図9は自溶合金溶射皮膜面を超硬合金工具と CBN工

具で切削した場合の切削仕上面の状態を走査型電子顕微鏡で撮影した結果である。超硬合金工具ではVBの急速な進行により、短時間で切削不能な状態に陥り、摩耗した刃先の前逃げ面による押付け（バニシ作用）によって部分的に光沢の見られる大きなうねりを伴う加工面となっている。一見して良好に見えるこの仕上面も切削痕よりも摩擦を伴う加工面状態で、切削によって得られるような規則的な送りマークはほとんど見られない。CBN工具による場合は、いずれの結合材の工具を用いても、切削条痕が明瞭に現れて規則性のある切削送りマークがはっきりと観察される。部分的に溶射欠陥と思われるピンホールが見られるほかに、切削条痕に介在微粒子の突出、微小な盛り上がり、へき開して破壊した部分が見られる。これらは溶射皮膜組織中の介在物や溶射欠陥、金属組織の不均質や硬さのむらなどから生ずるものである。このような加工面の状態が自溶合金溶射皮膜を切削した時の特徴である。特に、この現象は高切込み切削時に現れやすい。自溶合金のような硬さの高い材料の切削条痕には、工具周辺部への被削材の盛り上がり少なく工具先端形状の転写性が良い。

図10は工具材種を変化させて表面粗さ（最大高さ粗さ、 R_{max} ）を比較したものである。図中の粗さの表示は6か所の測定値から、その最大と最小の範囲と平均値を示している。平均の粗さは結合材 A、C、Bタイプの順に低下している。また、粗さのばらつき範囲も狭くなる傾向にある。Bタイプの工具でCBN配合割合を変化させて切削した場合、80%の工具の方が粗さは低くなり、粗さの範囲も狭くなる。超硬合金工具の場合はAタイプのCBN工具の粗さと類似している。しかし、急速な工具摩耗や食付きの悪さから、実際の切込みが設定した切込みよりも少なくなり、所定の加工量が得られていない。したがって、切削による加工痕よりも工具前逃げ面摩耗部の摩擦による摩擦痕が多く認められ、表面粗さはほかに比べて低くなっている。

図11はホーニング角の変化が表面粗さに及ぼす影

$\alpha h = 25^\circ, a = 0.1 mm, S = 0.075 mm/rev, V = 57 m/min$

Fig.10 Comparison of surface roughness with tool type

$V = 60 m/min, a = 0.15 mm, S = 0.075 mm/rev$

Fig.11 Relationship between surface roughness and honed edge angle

響について、CBN-Bの工具でCBN配合割合を変化させて得られた結果について示している。粗さはホーニング角を増加させるとしだいに低下して 15° 付近で最低値を示し、それ以後は角度の増加に伴って再び上昇する傾向が認められる。また、ホーニング角が小さい場合には、切削初期に刃先の先端部分の微小破壊や欠落が発生しやすくなり、前逃げ面の摩耗を助長することになる。したがって、 $\alpha h = 10^\circ$ 付近で粗さ値が大きくなるものと考えられる。

結合材、CBN配合割合の表面粗さに与える影響は、工

具前逃げ面の付着物の有無が仕上面粗さにも大きく影響している。したがって、付着量の少ないBタイプ、またはCBN配合割合の高いものほど、表面の粗さ曲線は規則的な切削溝を示し、工具の刃先形状の転写性が良好である。

4. 結 論

本報告では、Ni-Cr系自溶合金のCBN工具による被削性を切削切残し量、切削抵抗の3分力、そして切削加工面の状態から検討を行い、自溶合金の切削加工の可能性を明らかにした。得られた主な結果は次のとおりである。

- (1) 切削切残し量を測定した結果、設定切込みと切残し量の比率が数%以下になり、 $a=0.1mm$ 程度の低切込みにおいては切残しがほとんど認められなかった。
- (2) 切削抵抗の3分力はCBN工具の結合材の影響を強く受ける。特に、自溶合金の切削に対しては酸化物系のセラミックスが適している。
- (3) 表面粗さは結合材並びにCBN配合割合に影響される。結合材は酸化物系で、CBN配合割合の高いものほど良好な結果を得た。

したがって、自溶合金切削用のCBN工具材質の最適な条件は酸化物系結合材、CBN配合割合が60%でホーニング角を 25° とした場合という結論を得た。

本研究の遂行に当たり、ダイジェット工業株式会社より種々のCBN工具の試作、ならびにご提供をいただいたことを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本溶射協会編：溶射ハンドブック，新技術センター，(1987)311.
- 2) Y.Inui, T.Ikuta, R.McDonrd, T.Hayami and M. Nakazaki : Study on Grinding of Self-fluxing Alloy of Ni and Cr System, 10th Int. Thermal Spraying Conf.,(1983)11.
- 3) Y.Inui,T.Ikuta and T.Hayami: Study on the Cutting of Self-fluxing Alloy by CBN tools, First Int. Conf. Surface Engineering, (1986) 141.