PVD コーティング工具の進歩*

Progress of PVD Coated Tools

本西 英**
Suguru MOTONISHI

1. はじめに

ここ数十年間の切削工具分野での画期的な出来事は、1990年代に実用化された第3元素を添加した (Al, Ti) N 膜¹⁾²⁾のコーティング工具であろう。このコーティング膜はPVD法により、母材の特性を生かしながら、耐摩耗性や耐欠損性を非常に高めた技術として注目されている。このコーティング膜を適用した切削工具の性能向上には、めざましいものがある。従来は切削ができなかった金型などに使用している50~60 HRCの高硬度材が高速切削できる画期的な技術といえる。さらに超硬材料、工具設計やソーリング技術も総合して、60 HRCを超える焼入れ材を切削加工することが可能となり、これまでの加工方法であった放電加工に比べ大幅なコストダウンとリードタイム短縮を実現した。その結果、金型加工分野において焼入れ後にエンドミルで直彫り加工するダイレクトミーリングという加工方法が一般化している。

ここでは、PVD コーティング工具のうち (Al, Ti) N 系コーティング工具の進歩について、主にドリル、エンドミルに関して述べる。

2. PVD コーティングの原理と特徴

PVD 法は高速度工具鋼（以下、ハイスと呼ぶ）の焼戻し温度である550℃以下の低温でコーティングできることが最大の特徴である。1970年代後半からTiC、TiNおよびTiCN膜などでハイス製のホブ、ドリル、エンドミルに適用が図られてきた。

種々あるコーティング方法の中のアーキオンプレーティング法は、PVD法の中で (Ti, Al) N など多成分窒化膜のコーティングに最も広く用いられている。真空炉内に設置したTiAl合金をカソードとしたアーキ放電によりTi, Alを固体より直接蒸発イオン化し、同時に炉内に導入したN₂ガスを発生したプラズマ内でイオン化する。一方、基板にはバイアス電源により負の電荷を与え、生成した

Ti, Al およびNイオンを電気的な吸引力をもって基板上にプレーティングさせ密着力の大きい (Ti, Al) N 皮膜を形成する³⁾。アーキオンプレーティングは、イオン化率が80%以上と高く、コーティング膜組成の制御性に優れていることから、PVD法の中で生産性に優れたコーティング方法といえる。

CVD法は高温で被覆された状態から常温に冷却される過程でコーティング膜がより大きく収縮することにより、コーティング膜には引張りの残留応力が生じる。これに対しPVD法では、基板にバイアス電位を与え、イオンを打込みながら成膜するため、圧縮の残留応力が生じる。このことからPVDコーティングの耐欠損性はCVDコーティングよりも優れ、コーティング工具の耐欠損性を改善する効果がある。

3. (Al, Ti) N 系コーティング工具の性能

超硬工具のPVDコーティングといえばTi-Al-Nが主流となっている。アーキオンプレーティング法により、TiNにAlを添加することで、およそ70at% AlNまでは立方晶の結晶構造を保ち硬さが向上するといわれている。さらにAl量が増えるとAlNと同じ六方晶の結晶構造が現われ硬さが低下する¹⁾²⁾。

特に、高速切削において重要であるTi-Al-N膜の耐酸化性は、Al量が多いほど高くなる。アルミ (Al) が主成分である (Al, Ti) N コーティングは、800℃以上の耐酸化性が要求される高速切削やドライ切削に不可欠な耐熱性を向上させた皮膜といえる。

(Al, Ti) N を適用した超硬ドリルは、耐酸化性、皮膜硬度、密着力が高いことから、切削速度が30 m/minの場合の寿命比が2.4に対して、80 m/minでは3.2倍の長寿命を示した⁴⁾。(Al, Ti) N 膜はTiN膜に比較して高速切削においてより高い性能を発揮する高性能なコーティング膜といえる。

さらに、高硬度タイプの形状開発もなされて60~66 HRCの高硬度材の穴あけも可能となり、ステンレス鋼、Ni合金、Ti合金など難削材の高速切削化や切削工具の長寿命化にも寄与している⁵⁾。

なぜ、このような画期的な性能を発揮するのか、耐酸化性を高める機構についての池田らの仮説¹⁾²⁾をトレースした。その結果、(Al, Ti) N 膜の耐酸化性の高い理由であるコーティング膜中のAlの選択的酸化による、工具の最表層に生成するAl-酸化物の保護膜の存在を確認した⁶⁾。

*原稿受付 平成20年7月9日

**正会員 三菱マテリアル(株) (兵庫県明石市魚住町金ヶ崎西大池179-1)

本西 英

1973年神戸大学工学研究科修了。同年、(株)神戸製鋼所入社。工具開発、難削材加工、超精密加工研究に従事。2000年MMCコベルコツール(株)取締役、技術開発部長、精密工学会フェロー、博士(工学)。

表 1 (Al, Ti, Si)N 系コーティングの特性

	(Al, Ti, Si) N	(Al, Ti) N	TiN
硬さ (HV)	3200	2800	1900
酸化開始温度 (°C)	1100	840	620
密着力 (N)	80	80	60

4. (Al, Ti, Si) N コーティング工具の性能

50 HRC 以上の高硬度材の高速・高能率加工ニーズへ対応するため、Al-Ti-N に第 3 元素を添加してさらにその特性を高めた (Al, Ti, Si) N 膜が開発された⁷⁾。その膜は (Al, Ti) N に、さらに原子半径の小さい Si 元素を添加したものである。表 1 に示すように、(Al, Ti, Si) N の硬さと酸化開始温度は、(Al, Ti) N よりいずれも大幅に向上している。(Al, Ti, Si) N 膜の皮膜表面を TEM で観察すると、緻密な多結晶構造を呈しており⁷⁾、Si を添加することによりナノレベルの結晶が混在して結晶粒が小さくなり、硬さが向上する。

(Al, Ti, Si) N コーティングを施した 2 枚刃の超硬ボールエンドミルを用いて、SKD61・52 HRC 焼入材を 150, 300, 450, 600 m/min の切削速度で試験した。その結果、600 m/min の高速でも切削が可能⁷⁾であり、高速領域ほど (Al, Ti) N 膜と工具摩耗での優位性が顕著であった。

本皮膜を用いたエンドミルは SKD11 の 60 HRC 焼入材を 200 m/min の速度でも実用レベルで切削可能である。また、さらに硬度の大きい 69 HRC 粉末ハイスの焼入材も切削可能である⁸⁾。

高硬度材のダイレクトミーリングのニーズはますます高まっており、(Al, Ti, Si) N のような高硬度材加工用コーティングの適用範囲は今後も広がるであろう。

5. PVD コーティング工具が拓いた世界

(Al, Ti) N コーティングエンドミルが世の中に出たときは、工作機械の主軸の高速化技術が進展中であった。主軸が数万回転するマシニングセンターとの出会いにより、このエンドミルによる高速切削加工が進展し、金型産業ではリードタイム短縮の強力な武器となった。また、高速・高能率切削技術に対して、次のような関連技術も進展した。

マシニングセンターの高速化において高精度な工具の把握方法として、焼きばめホルダによるツーリング技術が進歩し、小径エンドミル加工の高速・高精度切削が普及した。

さらに微小な工具にもコーティングが可能となり、精密、微細エンドミル加工が実用化した。さらに、高硬度材料の研削加工を切削加工へ切り替える工法の変化も起こった。また、高速・高精度加工を実現するためのさまざまな

技術にも影響を与え、エンドミルなど軸物工具の精度を高精度で測定できる機器の出現や高速加工用ツールパスを創製する金型加工用 CAD/CAM の進歩も促した。

地球環境問題からもドライ切削の実現に (Al, Ti) N 系コーティング技術は不可欠である。あらゆる被削材に対しても工具寿命の延長が可能であり、昨今の資源の枯渇やレアメタル問題に対して、省資源化という観点からも大いに寄与できる。

6. む す び

W, Co などの切削工具に使用している金属は、いわゆるレアメタルと呼ばれており、資源の枯渇やその埋蔵が偏在しており、今後、資源問題として大きな問題となると予想される。

世界規模では自動車、航空機はさらに拡大が予想されるが、それらの製造に切削工具は不可欠である。地球環境・資源問題からも、切削工具の寿命延長の有力な技術である PVD コーティングは、リサイクル化も含めて省資源化の重要な技術の一つである。

1906 年に発明されたハイスから最近のダイヤモンドコーティングまで種々の工具材料があるが、さらなる高性能な工具材料の出現が期待されている。PVD 技術としてはさらなる密着力のコントロールや鋼がより高速で切削可能な cBN, C₃N₄ コーティング膜の実現や省エネルギーのためのさらなる高速、高能率切削に耐えるコーティング膜の出現が大いに期待される。

参 考 文 献

- 1) T. Ikeda and H. Sato: Phase Formation and Characterization of Hard Coatings in the Ti-Al-N System Prepared by the Cathodic Arc Ion Plating Method, *Thin Solid Films*, 195 (1991) 99-110.
- 2) 池田孜, 佐藤廣士: PVD 法によって作製した Ti-Al-N 系硬質膜の高温酸化特性と耐摩耗性, *日本金属学会誌*, 57, 8 (1993) 919.
- 3) 山田保之, 池田孜: コーテッド工具—ドリル・エンドミル, *精密工学会誌*, 61, 6 (1995) 778.
- 4) 勝田道隆, 山田保之, 田中祐介: 高性能超硬コーティング工具ミラクルドリル, *機械と工具*, 9 (1990) 29-34.
- 5) 山田保之, 青木太一, 田中祐介, 北浦精一郎, 早崎浩: (Al, Ti) N コーティド超硬エンドミルによる難削材の加工, *日本機械学会論文集 (C 編)* 64, 624 (1998) 413.
- 6) Y. Yamada, T. Aoki, Y. Tanaka, H. Hayasaki and S. Motonishi: High Speed Cutting Performance of (Al, Ti) N Coated Carbide Endmills, *Proceedings of the Third International Conference on Progress of Cutting and Grinding*, Nov., 19-22, (1996) 211-216.
- 7) Y. Tanaka, N. Ichimiya, Y. Onishi and Y. Yamada: Structure and Properties of Al-Ti-Si-N Coatings Prepared by the Cathodic Arc Ion Plating Method for High Speed Cutting Applications, *Surface and Coatings Technology*, 146-147 (2001) 215-221.
- 8) 山田保之, 青木太一, 田中祐介, 脇平浩一郎: コーティド超硬工具による高硬度材の加工, *日本機械学会論文集 (C 編)* 60, 577 (1994) 14.