

硬質 DLC (AC-X) 被覆工具の開発

瀧真*、長谷川祐史*、石川剛史**、滝川浩史***、安井治之****

*株式会社オンワード技研 (〒929-0111 石川県能美市吉原町ワ-1 3)

**日立ツール株式会社 研究センター (〒286-0825 千葉県成田市新泉 13-2)

***豊橋技術科学大学 電気・電子工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

****石川県工業試験場 機械金属部 (〒920-8203 石川県金沢市鞍月 2-1)

Development of Super Hard DLC (AC-X) coated tools

Makoto Taki*, Yuji Hasegawa*, Takeshi Ishikawa**, Hirofumi Takikawa***, Haruyuki Yasui****

*Onward Ceramic Coating Co. Ltd. (Wa-13 Yoshihara, Nomi, Ishikawa 9290111)

**Hitachi Tool Engineering Ltd. (13-2, Shinizumi, Narita-shi, Chiba-ken, 286-0825)

*** Department of Electrical and Electronic Engineering, Toyohashi University of Technology
(1-1, Hibarigaoka, Tenpaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580)

**** Industrial Research Institute of Ishikawa (2-1 Kuratsuki, Kanazawa, Ishikawa 9208203)

Keyword: Diamond-like Carbon, ta-C, Cutting Tools, Filtered Cathodic Arc

1. はじめに

アルミニウムや銅といった非鉄金属を切削加工する場合、切削工具の切刃部分に被削材が凝着して切削抵抗が大きくなり、刃先が欠損するといった問題が生じる。これらの問題の解決法として、DLC (ダイヤモンドライクカーボン) で被覆した切削工具が実用化されている。しかし、近年において、被削材の材質は、アルミニウム合金の中でもダイキャスト用合金である Si や銅が添加された AC 系の材料が増加している。これは自動車の軽量化を目的として、エンジンプロック等の部材への採用が増加しているためである。AC 系のアルミ合金は、Si 等の硬質粒子を多く含有するため、従来の水素を含む DLC (a-C:H) では十分な硬度が得られずに刃先部を被覆する DLC が磨耗してしまい、そこから被削材の凝着が始まってしまう。

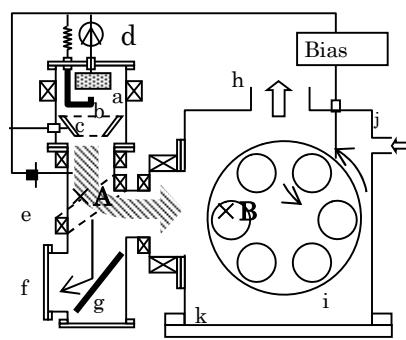
これに対し、本稿で解説する真空アーク法による水素フリーDLC (ta-C) では固体グラファイトを原料とし、高真空中にて成膜するため、膜中に水素が含まない、極めて高硬度な DLC 膜を成膜することができる。しかし、

アーク放電に伴いアーク陰極からのドロップレット (サブミクロン~数十 μm 程度の陰極材料微粒子) の放出が問題となる。このドロップレットが膜中に取り込まれると、単に表面粗度が悪化するだけでなく、剥離の原因ともなってしまう。このため様々なドロップレットフィルターが考案されている⁽¹⁾。本稿では現在開発中である、T 型フィルタードアーク法 (T-FAD) により膜中におけるドロップレットの混入を極限まで下げた、ta-C 膜 (AC-X) のアルミ切削工具用保護膜への実用化に関して解説する。

2. T-FAD

2. 1 装置概要

今回開発した T-FAD 装置を図 1 に示す。同装置は黒鉛陰極の真空アークプラズマ源を備え、T 字状のプラズマ磁気輸送ダクトを介して、成膜プロセスチャンバと接続されている。



- a) Graphite Target
- b) Trigger Electrode
- c) Anode
- d) DC power supply for arc discharge
- e) DC power supply for Duct Bias
- f) End pocket
- g) Reflector
- h) To vacuum pump
- i) Rotor platform
- j) Gas inlet
- k) Process Chamber

図1 T-FAD 概略図

カーボンプラズマは、プラズマ発生部およびダクトに取り付けられた複数の電磁コイルが発生する磁界によって、Tダクト内で直角に曲げられ、プロセスチャンバに輸送される(図中斜線太矢印)。

黒鉛陰極から発生したドロップレットは磁界の影響を受けないため、陰極と対抗する方向に設置した延長ダクト(ドロップレット捕集ダクト)の方向に直進し、カーボンプラズマから除去される(図中実線)。一旦捕集ダクトに入ったドロップレットは、ダクト内で反射を繰り返して運動エネルギーを減衰させられ、最終的にダクト内に堆積する。このようにして、T-FADはドロップレットをほぼ完全に取り除くことができる⁽²⁾。

2. 2 成膜条件

ta-Cの成膜条件は以下のようにした。基材には鏡面研磨済み超硬(日立ツール製、型番WH10)を用い、アセトンと拭き取り洗浄後、装置内に搬入した。

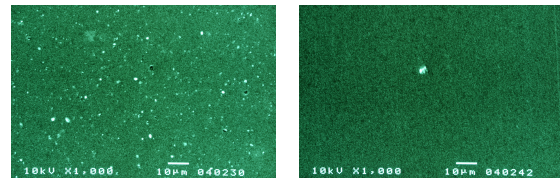
ドロップレット比較用の試料は図1中A、Bの位置に設置した。また、成膜時の圧力は0.02Pa以下、基板温度は100度以下、基板バイアスはDC-100Vとした。a-C:Hとの比較試料は、Arプラズマエッチングによる前処理(Arをボンバード)を追加し、基板を回転させた前述条件で成膜した。

比較用 a-C:H は炭化水素系のガスを用いた、プラズマ CVD (PECVD) により作成した。

2. 3 ドロップレット比較評価

T-FADのドロップレット除去効果を評価するために図1中AとBの位置に超硬基板を設置

し、同程度の膜厚になるように成膜時間を調節して成膜した膜をSEMで表面観察した。生成膜のSEM像を図2(a)、(b)に示す。



(a) position A

(b) position B

図2 ドロップレット評価試料表面 SEM 像

図2(a)がフィルターなし(成膜時間:40sec)に相当する図1中Aの位置での生成膜のSEMによる表面観察結果である。これより1μm程度のドロップレットが多量に存在することが分かる。図2(b)はT型フィルタリング(成膜時間:4min)した図1中Bの位置での生成膜の表面SEM観察結果である。これよりドロップレットがほとんど存在しない事が分かる。

表1には成膜レートとドロップレットの密度を示した。成膜レートは、T型フィルタリングにより1/12.5まで低下するものの、ドロップレット飛来レートは1/1,620まで激減する。この結果、極めてドロップレットの少ない成膜が可能となっている。

T-FADを利用することで、膜の表面の平滑度が向上し、摩擦係数の低下や密着力が向上することなどが期待される。

位置	膜厚 (μm)	成膜時 間(s)	成膜レート (nm/s)	ドロップレット数面積密度 ($1/\text{mm}^2$)	ドロップレット数飛来レート ($1/\text{mm}^2/\text{sec}$)
A	0.4	40	10	2.63E+04	6.56E+02
B	0.2	240	0.8 (1/12.5)	9.72E+01	4.05E-01

表 1 成膜レートとドロップレット密度

3. ta-C 膜の特性

T-FAD により成膜した ta-C と他の炭素系膜のナノインデントによる硬度と弾性係数のグラフを図 3 に示す。

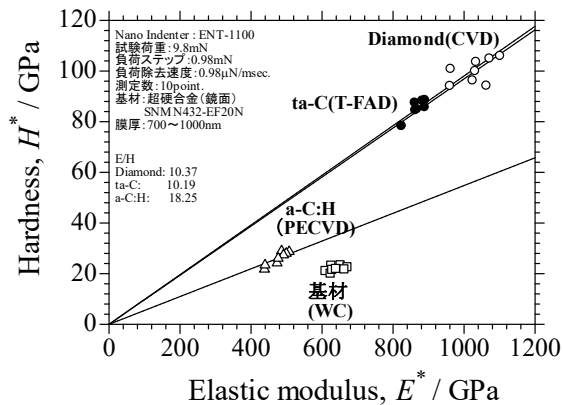


図 3 各種炭素膜の硬度－弾性係数比較

図より明らかなように、ta-C は a-C:H(従来 DLC)の 3 倍以上の硬さを持ち、ダイヤモンドに準じる硬さ(H)と弾性係数(E)を示すことが分かる。さらに、これらから、塑性指数 ϕ をもとめることができる。

$$\phi = E/H \sqrt{\sigma/R}$$

(σ :突起高さの標準偏差
 R :突起先端部の平均曲率半径)

の材料定数 E/H を算出した。 E/H は塑性指数の材料定数であり、値が小さいほど塑性変形し難いことを示している⁽³⁾。通常の材料は 14~20 程度の値である事が知られており、実際 a-C:H の場合 18.25 である。これに対し ta-C は 10.19 とダイヤモンドの 10.57 とほぼ同じ値を示す。このような E/H の値の低さは、膜が弾性的であることを意味し、ta-C のように E/H が低い膜は変形のエネルギー

ギーを弾性的に蓄えるため、アブレッシブ磨耗に強いとされている。

なお、一般的に高硬度な膜は、その内部応力によって十分な密着力が得られない場合が多い。しかし本 ta-C 膜はドロップレットが少なく、弾性的で基材変形への追従性が優れていることもあり、実用上十分な密着力を持っていることも追記しておく。

図 4 にはボールオンディスク試験機による ta-C、a-C:H 膜とアルミボールの摺動試験結果を示す。図より、アルミに対して ta-C が a-C:H より約 30% も摩擦係数が低い事が示された。

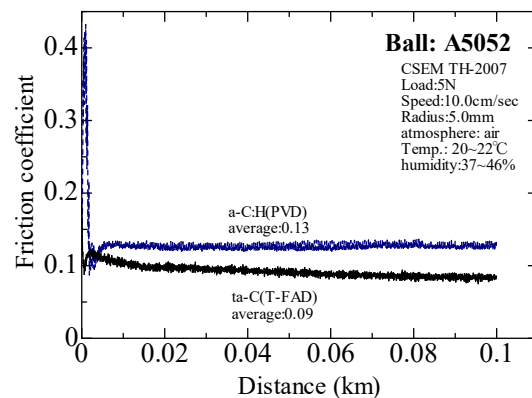


図 4 ta-C, a-C:H 膜のアルミボールに対するトライボロジー特性

なお、試験後の ta-C の磨耗量は、計測できない程度の極僅かではなかった。

また、SUJ2 ボールを利用した場合でも ta-C の方が a-C:H より低い摩擦係数を示した。

これらの結果は、高い硬さと表面平滑性の高さの相乗効果によるものと示唆される。

4. ta-C の切削工具への応用

超硬インサートチップ（APET160508PDFR-S型）に上記 ta-C 膜のコーティングを施して、切削評価を行った。切削評価はマシニングセンターにて切削速度 $V=300\text{m/min}$ 、切り込み $Ad=5\text{mm}$ 、 $Rd=5\text{mm}$ 、送り $f=0.15\text{min/t}$ の削り加工をドライで行った。被削材はアルミニウム合金 A5052 と ADC12 を用いた。

図 5 に A5052 を 7 m 切削後のインサートチップのすくい面写真を示す。

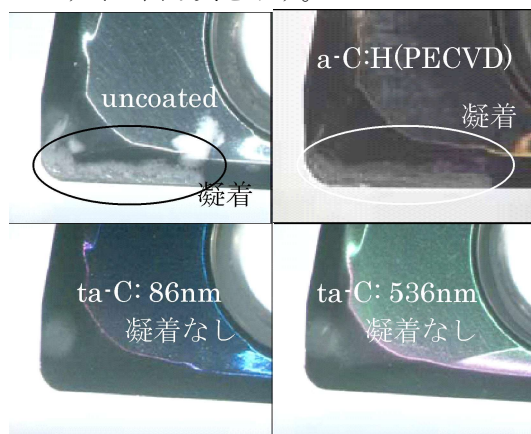


図 5 切削試験後の凝着画像

比較的加工性の良い A5052 の切削であっても、a-C:H 被覆インサートチップは未コーティングの超硬合金インサートチップと同様にアルミが凝着している。これに対して、ta-C をコーティングしたインサートチップには、試験を行った 86nm~536nm の膜厚の全てのインサートチップにおいて目視では凝着が殆ど確認できなかった。

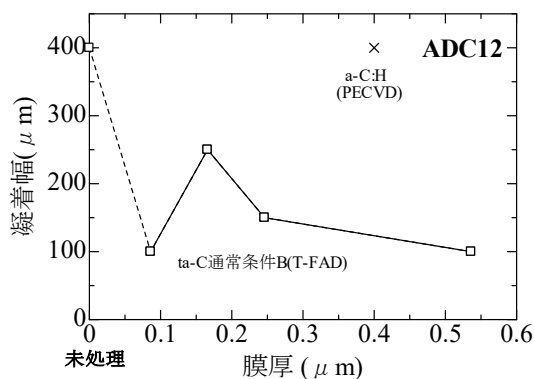


図 6 アルミの凝着幅の ta-C 膜厚依存性

図 6 には ADC12 の 7 m 切削試験後の凝

着幅の ta-C の膜厚依存性を示した。

これより ADC12 に対しても、a-C:H 膜、未コーティングインサートチップと比べて ta-C は明らかに凝着幅が少なく、特に膜厚が厚くなるとその傾向が顕著になる。

図 7 には、各膜厚の ta-C 膜被覆インサートチップによる ADC12 切削時の切削層のカール形状写真を示す。また、図 8 には切削層のカール径の膜厚依存性を示した。

これから、A5052 の切削試験においては ta-C の膜厚に対して切り屑のカール半径は殆ど変化しないことが分かる。また、ADC12 の切り屑は ta-C の膜厚の増加に伴い切り屑のカール半径が小さくなってきている事が分かる。さらに、写真より ADC12 の切削試験においては ta-C の膜厚が最も薄い 86nm のインサートチップの切り屑は、未処理のものに近いことが分かる。

一般に切削屑は、逃げ面側の摩擦力により、そのカール半径が変化する。逃げ面の摩擦力が小さければ、切り屑はすくい角に従って小さくカールし排出される。逆に摩擦力が高くと、切り屑が逃げずにすくい面に沿って切り屑が伸びていく。これがさらに進行すると凝着となり、凝着が始まると急速に摩擦力が増加し、刃先の損傷や被削面の面粗さの増大が生じる。つまり、切削にとっては、切り屑が小さくカールすることが重要になる。

なお、切り屑は極めて高温になるため、切り屑が小さく排出性が優れば、放熱性も向上することになる。このように、切り屑のカール径の小ささは、工具用保護膜の重要な評価法の 1 つである。

さて、A5052 のように加工性のよい材料の場合、ta-C はその高硬度さゆえに、ほとんど磨耗しないと考えられる。このため、膜厚は極薄くても磨耗せず、このため凝着も生じない。むしろ、刃先形状が保たれる極薄の ta-C の方が切削抵抗を下げると考えられる。

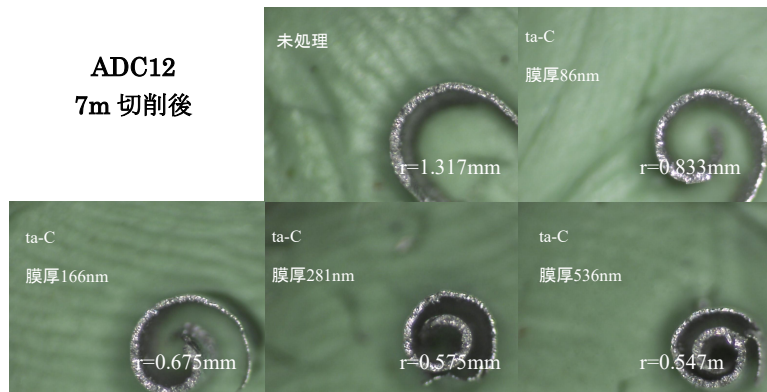


図7 ta-C の ADC12 切り屑カール半径

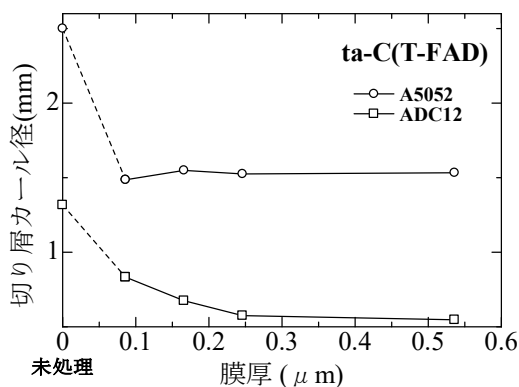


図8 切り屑のカール径の ta-C 膜厚依存

なお、A5052 に対する同様な耐久切削試験の結果では、a-C:H が切削長 200m までしか持たなかったのに対して、ta-C は 50 倍以上の 10 km もの切削を行なっても凝着は生じず、まだまだ切削可能であった。

これに対し、ADC12 は Si を含む硬質粒子を多く含有している。このため極端に薄い ta-C では早々に刃先の膜が磨耗し、母材の露出に伴って摩擦係数が増加した結果、図 7、図 8 のように切り屑のカール径が増大すると考えられる。むしろ、膜厚が 200nm 以上の、比較的厚めの ta-C のインサートチップにおいて、小さなカール径が維持されている。凝着幅の少なさを鑑みても、ADC12 の切削には膜を厚めに被覆したほうがよいことが分かる。

5. まとめ

膜厚が 200nm 以上の比較的厚膜の ta-C を被覆した切削工具が様々なアルミ合金に対して、高い切削性能が得られることが分かった。

通常のアーク法により厚膜 ta-C (200nm~) を成膜した場合、ドロップレットの影響で十分な密着力が得られず、膜はすぐに剥離してしまう。また、T-FAD と同類の磁気フィルターを用いても、十分なフィルター効果が得られなければ、ドロップレットの欠落等により母材が露出し、凝着が生じてしまうことが示唆される。

厚膜化により、ハイシリコンのアルミ合金 (ADC12 等) の切削性能を向上できたのは T-FAD による高効率なフィルター効果が得られて初めて可能となったと推察できる。

本稿では、T-FAD により成膜した ta-C 膜の特性とアルミ切削工具への応用例を紹介した。しかしながら、ta-C は、高い硬度と低い摩擦係数を併せ持つ他、絶縁性や平滑性、撥水性に加え、成膜温度が 100°C 付近など、魅力的な特性を多く持っている。

今後、工具以外の様々な用途にも応用されていくことが期待されている。

文献

- (1) J. Robertson ; *Mat. Sci. Eng. R.*, **37**, 129 (2002)
- (2) H. Takikawa, K. Izumi, R. Miyano and T. Sakakibara; *Surf. Coat. Tech.*, 163, 368, (2003).
- (3) S. Miyake, T. Saito, K. Yu, T. Mikami, K. Ogata; *J. Surface Finish. Soc. Jpn.*, **55**, 669, (2004)