

一般論文

関連するSDGs



平滑厚膜DLC成膜装置の開発

Development of Smooth and Thick Diamond Like Carbon Film Coating System

岡崎 尚 登
Okazaki Naoto
熊谷 竜 一
Kumagai Ryuichi
長南 誠 宏
Chonan Takahiro

大城 竹 彦
Ooshiro Takehiko
高松 玄
Takamatsu Hajime

概要

アーカイオンプレーティング法で作製するダイヤモンドライクカーボン（DLC）膜は、耐久性において他のDLC膜より優れているが、膜が粗く摺動する相手材を摩耗させる場合があった。この度、膜の粗さを大幅に改善できるフィルタードアーク方式の成膜装置および成膜プロセスを開発し上市したので報告する。

Synopsis

Diamond like carbon (DLC) film produced by arc ion plating method, is superior in the durability than the other DLC film. But because of its roughness, the scratch wear in the counterpart material was seen. This time, we have developed the coating system that can improve the film roughness by using filtered arc method and we took it into the market.

1. はじめに

日本アイ・ティ・エフ株式会社（以下、当社）では、窒化チタン膜などの金属窒化膜およびダイヤモンドライクカーボン（以下、DLC）膜のコーティング受託加工サービス事業と、それらの膜の成膜装置の製造・販売の事業を展開している。受託加工サービス事業は、日本のみならずアジア（中国、タイ、インド、ベトナム）にも海外拠点を設け、グローバルなサービスを日本品質で、お客様に提供している。

カーボンニュートラルに代表されるような、低炭素社会の実現に向け、省エネルギー化や、自然エネルギーの活用、CO₂を出さないエンジンなどの開発等に拍車がかかっている。摺動部の摩擦抵抗を下げる事で、エネルギーロスを低減できるDLC膜の表面処理は、上記の流れに沿う技術であり、今後益々需要が増えるも

のと予想される。

本稿では、DLC膜の形成プロセスおよびその成膜装置「MF720」の開発について紹介する。

2. 水素フリーDLC膜

DLC膜は、PVD（Physical Vapor Deposition）法またはCVD（Chemical Vapor Deposition）法のいずれでも形成する事ができる。PVD法で形成する水素原子を含まない水素フリーDLCは、切削工具や金型、機械部品、自動車部品などの過酷な摩擦環境で、耐摩耗性の効果をより長く発揮することができる。当社では、世界で初めて、アルミ加工用の一般切削工具に水素フリーDLC膜を適用⁽¹⁾して以来、さまざまなニーズに向けてこの技術を適用してきた。

PVD法の一種であるアークイオンプレATING法（以下、アーク法）でDLCを成膜する場合、グラファイト材を陰極としてアーク放電を起こし、そのエネルギーでグラファイトを昇華させる。アーク法は、他の方法と比較してイオン化率が高いため、基材にマイナスの電圧を与える事によりイオン衝撃が発生し、緻密で高硬度の膜が形成できる。

一方、グラファイト材にアーク放電を起こすと、アークスポットと呼ばれる小さいエリアに、放電による大きなエネルギーが集中するため、昇華される原子と共に比較的粗大な粒子（マクロパーティクル）が、周辺の領域を破壊する事で放出される。昇華される原子と、マクロパーティクルとは同じ方向に飛び出し、その飛び出し方向に基材がある場合には、DLC膜が成膜されると同時にマクロパーティクルも取り込まれ、膜の平滑性を悪化させる。

前述のような、膜の平滑性が悪い水素フリーDLC膜では、摺動する相手を摩耗させる場合があるため、成膜後に磨き加工を施すなど、後加工が必要となる場合が多い。

後加工をしない別な水素フリーDLC膜を形成する方法としては、フィルタードアーク方式（図1）が過去から試され⁽²⁾、一部工業的に利用される様になった。当社でも過去に、その方式の装置を開発したが、成膜領域の狭さと成膜速度が遅い事から、量産には向かないものであった。

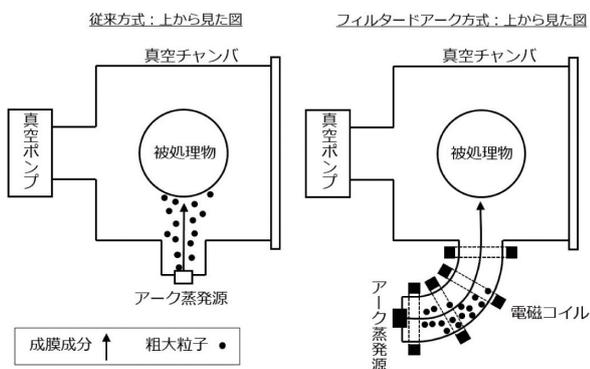


図1 従来方式とフィルタードアーク方式の違い

2. 1 新規フィルタードアーク蒸発源の開発

グラファイトのマクロパーティクルは、ドロプレット（液滴）ではなく固体であるため、従来法で成膜時に真空チャンバ内壁で何度も跳ね返る。フィルタードアーク方式であっても、何度も跳ね返るうちに一部は基材側に放出され、従来法ほどではないが平滑性を悪化させる。それを防ぐためには、ダクト経路をなるべく長くし、内側にフィンを配置し

て、跳ね返るマクロパーティクルの基材側への通過確率を下げる方法があるが、ダクト部分が大きくなる。それにより、成膜成分の通過率も低下するので、成膜速度が低下し、また、蒸発源を多数搭載する事ができないため、平滑性は向上するが生産性が悪化する。

本開発においては、そのトレードオフの関係にある平滑性と生産性を両立するために、強い磁場でカーボンイオンをコンパクトに曲げる事で、ダクト距離の短縮とダクト部分の小型化を図るとともに、内部のフィン配置の最適化を重点的に行った。

開発ツールとしては、三次元の衝突シミュレーション（図2）や磁場解析ソフトなどを用いた。シミュレーションと実験とを繰り返した結果、効率良くマクロパーティクルを除去しつつ、成膜速度の速いフィルタードアーク方式の蒸発源が完成した。また、ダクト部分が小型化できたことにより、この新規フィルタードアーク蒸発源を、複数配置することで、広いコーティング面積を確保し、生産性の向上と良好な面粗度の両立を実現した。これを、マルチフィルタードアーク（MFA）蒸発源（図3）と名付けた。図4に、従来法とMFA法によるDLC膜の面粗度の比較写真を示す。MFA法では、大幅にマクロパーティクルが低減されていることがわかる。

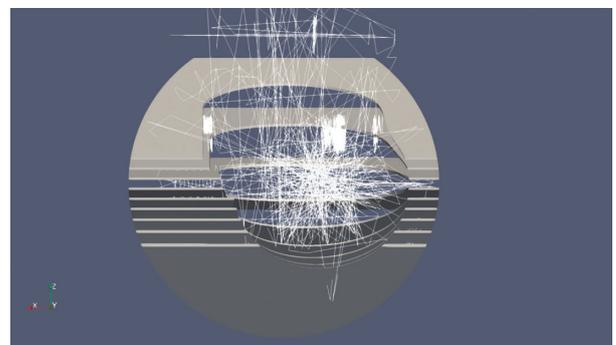


図2 三次元衝突シミュレーションの例

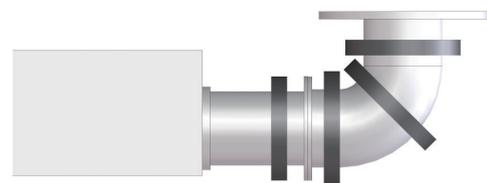


図3 MFA蒸発源（複数の内の1台）概念図

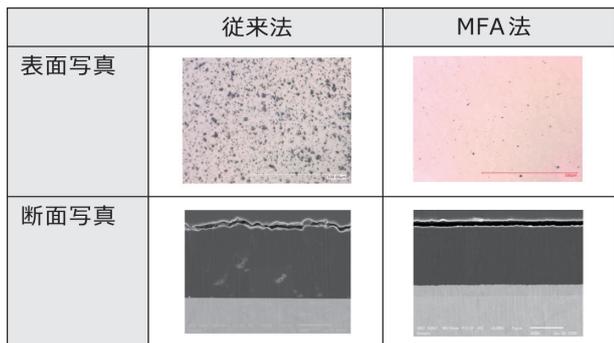


図4 面粗度の比較

また、DLC膜は鉄系基材上に、密着性が良い状態で直接成膜する事が難しいため、まず金属の密着層を成膜してからDLC成膜を行うのが一般的である。当社では、このDLC膜の優れた平滑性を損なわず、かつ密着性に優れた成膜プロセスも同時に開発した。

2.2 DLC膜の特性

フィルタードアーク方式は、イオン性の高いDLC膜の形成プロセスであり、成膜時に、あるパラメータを変化させることで、膜硬度が線形に変化する傾向がある(図5)。最大で75GPaものDLC膜の成膜が可能である。

超高硬度のDLC膜は、成膜直後から剥離が始まる場合が多いが、前述の密着層を成膜することにより、剥離せずに、なおかつ、ある程度の膜厚で形成できるため、工具、金型、機械部品、自動車部品の耐摩耗性を大幅に向上させる事が可能となった。

図6は、SRV (Schwingungs Reihung und Verschleiss) 法による振動摩擦摩耗試験機で、アルミディスクとDLC膜付き円柱を摺動した後のDLC側の摩耗量の比較である。マクロパーティクルが少ない

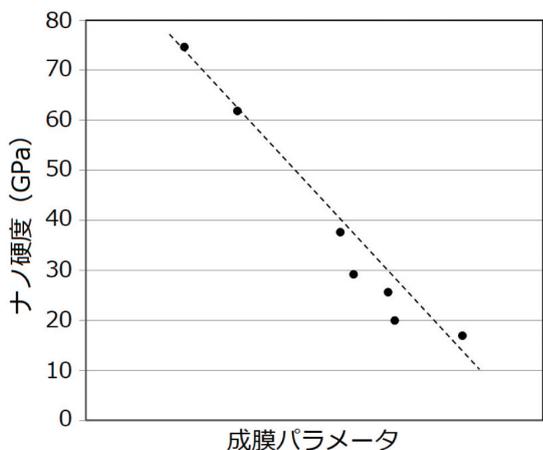


図5 MFA蒸発源によるDLC膜の膜硬度変化

MFAのDLC膜は摩耗量が従来と比べて40%低減できている。

図7は、ブロックオンリング法によってDLC膜の摩耗量を従来法と比較した例であり、50%の摩耗量低減が認められている。

図8は、表面粗さ計によって計測した平均粗さ(Ra)を膜厚で割ったもので、DLC膜の膜厚1μmあたりの平均粗さの比較を示した。従来法と比較して、平滑性が大幅に向上している。

図9は、スクラッチ試験機によって、DLC膜と基材との密着性を定量的に従来法と比較したものであり、密着性についても向上がみられ、約1.5倍に強化されている事がわかる。

当社では、これらの優れた特性を活かしてさまざまな用途での適用提案を実施している。

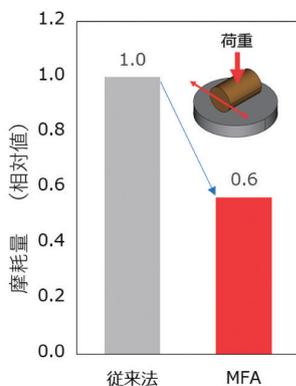


図6 SRV法による耐摩耗性の比較

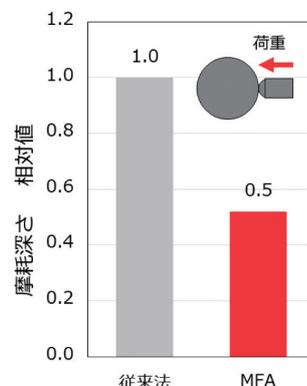


図7 ブロックオンリング法による耐摩耗性の比較

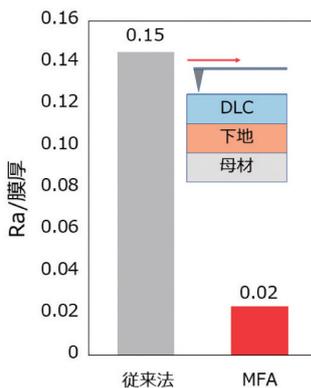


図8 表面粗さ計による面粗度の比較

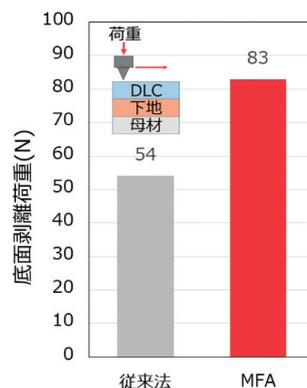


図9 スクラッチ法による密着性の比較

3. 成膜装置

当社では、前述のMFA蒸発源を5台搭載したMF720（図10）を開発し、2021年6月から販売を開始した。MF720は、密着層形成用の機器やボンバード処理（基材の清浄化処理）を行うプラズマ源をも備えており、主な性能を表1に示す。



図10 MF720の外観写真

表1 MF720の主な仕様、性能

項目	仕様・性能
装置型式	MF720
コーティングゾーン	φ720xH750 (mm)
DLC成膜速度 (自公転時)	0.7μm/h
蒸発源ユニット	MFA蒸発源 5台
制御方式	自動運転
設置スペース	W5000×D7000×H3000mm

この装置の開発のため、以下に述べる課題を解決した。

3.1 平坦な放電面の維持

グラファイトを陰極としたアーク法は、前記の様に、ミクロな領域で破壊を伴う放電形態で、マクロパーティクルが多く発生する事もあり、金属の場合と比べて消耗速度が速い。数十μmの膜厚が要求される製品分野では、陰極に一定の体積が必要である。グラファイト材の場合、アークスポットが動きにくいという特徴もあり、細長い円柱形状の陰極として、消耗に応じて前進させる送り出し機構を備える事が一般的である。

しかし、アーク放電を続けると陰極の放電面に凸凹が生じていき、消耗に応じて陰極を前進させるので、部分的にしか消耗されなくなり、最後まで放電面の平坦性を維持するには、さまざまな対策が必要であった。

アーク放電を開始するには、トリガー電極を放電面に触れさせ、スパークを起こす事が必要であり、当社ではこのトリガーの動きに工夫を加え、細長い

円柱形状の放電面が消耗した場合でも、最後まで平坦な放電面を維持する事に成功した。

3.2 堆積するマクロパーティクルの処理

蒸発源の内部に堆積するマクロパーティクルは、導電性である事から、蒸発源内部の絶縁部に溜まった場合は、正常な放電が維持できない。数十μmの厚膜を成膜する場合は、成膜中、絶縁性を維持しておくことが不可欠となるが、これについても検証を重ね解決できた。

4. まとめ

DLC膜の形成と本装置の開発においては、当初より安全性、実用性、性能、コストの検証を、チェックを行いながら進めた。

完成した装置の膜性能は、従来のDLC膜を性能で大きく上回っており、今後の当社の競争力となると確信する。今後は、さまざまなアプリケーションへの適用に挑戦していく所存である。

5. 謝辞

本装置を開発するにあたり、三次元の衝突シミュレーションや磁場解析については、住友電気工業株式会社に多大なるご協力をいただいた。この場を借りてお礼を申し上げる。

参考文献

- (1) 大谷、岡崎 他：特許3718664号
- (2) 村上、三上 他：特許公開公報2002-105628号

執筆者紹介



岡崎 尚登 Okazaki Naoto
日本アイ・ティ・エフ株式会社
常務取締役 装置部長



大城 竹彦 Ooshiro Takehiko
日本アイ・ティ・エフ株式会社
開発部 グループ長



熊谷 竜一 Kumagai Ryuichi
日本アイ・ティ・エフ株式会社
技術部



高松 玄 Takamatsu Hajime
日本アイ・ティ・エフ株式会社
開発部



長南 誠宏 Chonan Takahiro
日本アイ・ティ・エフ株式会社
開発部