面接触をする窒化炭素膜の窒素潤滑下の摩擦特性

Friction Properties between CN_x Coated Plate Slid against Themselves in N₂ Lubrication

正 足立 幸志 (東北大・院)

○ 学 松本 雄二郎 (東北大・院)

正 加藤 康司 (東北大・院)

Koshi ADACHI, Yujiro MATSUMOTO, Koji KATO

Tohoku University, Aramaki-Aza Aoba 6-6-01, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579

Key words: Carbon Nitride, Diamond-Like Carbon, Hard Coatings, Nitrogen Lubrication.

1. 緒言

機械の摺動面においてその多くが面接触で摺動されており、この摺動面で発生する摩擦・摩耗を低減させる方法として従来、一般的に油潤滑がなされてきた。油潤滑を用いた設計を行う際には設計指針として流体潤滑の潤滑領域を示すストライベック曲線などが用いられてきた。近年、新しい潤滑方式として摩擦係数 0.1 以下の低摩擦を実現することが可能な DLC^[1] (Diamond-Like-Carbon, ダイヤモンド状炭素)と総称される炭素系材料が注目されている。

またβ-C₃N₄ がダイヤモンド以上の硬さを有することが報告されて以来^[2]、数多くの研究がされているが、アモルファス窒化炭素膜(以下 CN_x)においても優れた摩擦特性を示す。CN_x 膜の Ball/Disk 摩擦試験において環境雰囲気が大きくその摩擦特性に影響し、窒素雰囲気下においては最小で 0.005 の超低摩擦を示すことが報告されている^[3]。また接触形態を平面接触とした際においても、窒素ガス雰囲気中において CN_x 膜同士の摩擦をさせた際にも摩擦係数 0.01 以下の超低摩擦を示すことが報告されている^[4]。

平面接触における CN_x 膜の窒素ガス潤滑においても優れた摩擦特性を示すことから、新たな潤滑方法として機械設計に用いることが出来ると考えられる。本報では、平面接触をした CN_x 薄膜の窒素ガス潤滑下での摩擦試験を行うことで摩擦係数 0.05 以下の低摩擦となる為の必要条件を実験的に明らかにする。

2. 実験方法

平面接触する CN_x 薄膜の窒素ガス潤滑での摩擦評価のためにシリンダー/ディスク型の摩擦試験装置を設計した。試験片は窒化ケイ素ディスク(φ = 20 mm, t = 8 mm)及び窒化ケイ素シリンダー(外径φ_o = 20 mm, 内径φ_i = 5 mm, t = 4 mm)を用いた。またシリンダー試験片の表面には幅 3 mm, 深さ 0.5 mm の溝を 2 本及び 4 本施し、また同時に内径部に沿って C0.5 の面取りを行ったものと面取りしていないものを用いた(Fig. 1)。CN_x 薄膜はカーボンの電子ビーム蒸着と同時に窒素イオンを注入するイオンビームミキシング法により、窒化ケイ素ディスク及びシリンダー上に成膜された。成膜速度は 2 nm/sec, 膜厚は 400 nm で一定とした。成膜後のディスク及びシリンダー試験片の表面粗さは Ra = 0.0169 μm, 0.0142 μm となった。

摩擦試験方法の概略図を Fig. 2 に示す。荷重は 9.0 - 57 N, 回転速度は 60 - 500 rpm とした。このときの見かけの接触面圧は 0.030 - 0.285 MPa となり平均すべり速度は 0.04 - 0.16 m/sec とした。内径 4.5 mm のポリウレタンチューブを中空シャフトに 10 mm 差込んだ状態で、中空シャフトとチューブは固定せずシールをしていない状態において窒素ガスを流量 0.5 - 5.0 l/min で供給した。窒素ガスの摩擦面への供給量を知ることは必要不可欠なことであるが、本研究においては簡易的な方法で定性的に供給量を測定し試験片の溝数により窒素ガスの供給量は変わらないことを確認した。

Fig. 1 Schematic diagram of disk and cylinder specimens
(a) Disk specimen (b) Cylinder specimens

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

3. 実験結果

3.1 平面接触での摩擦挙動

平面接触での CN_x 膜の窒素潤滑におけるすべり速度、荷重を変化させたときの典型的な摩擦挙動を Fig. 3 に示す。荷重もしくはすべり速度が高い実験条件では摩擦試験開始直後に CN_x 膜は剥離し高い摩擦係数を示した。また荷重およびすべり速度が低い場合においては摩擦係数は安定せず平均の摩擦係数でも 0.15 程度と高い摩擦係数となった。荷重 18.8 N, すべり速度 0.16 m/sec において摩擦係数 0.01 の安定した低摩擦を得た。しかし、同条件であってもその寿命にバラつきがあり、1000 サイクル程度で CN_x 膜が剥離する場合も存在した。このときの剥離直後のシリンダー試験片表面の光学顕微鏡写真を Fig. 4 に示す。Fig. 4 より 10 μm 程度の微小な剥離から CN_x 膜の剥離が進展していることが分かる。薄膜の剥離は界面から起こることはよく知られている。これは成膜条件等の密着強度に関係することで複合膜等の研究がなされている。剥離の臨界値を増加させることは実用的に必要不可欠である。

3.2 CN_x 薄膜の剥離に及ぼす面取りの影響

Fig. 4 にシリンダー試験片の内径に沿って面取りを施したものと施していないものを用いた場合の摩擦係数の変化を示す。面取りを行っていないものは摩擦試験開始後 3000 サイクル程度で CN_x 膜は剥離してしまったが、面取りを施

Fig. 3 Typical changes in the friction under several experimental condition

Fig. 4 Optical image of initial delamination

Fig. 5 The effect of chamfering on life time

Fig. 6 The effect of contact pressure on friction coefficient under different sliding speed

Fig. 7 The effect of sliding speed on friction coefficient under different contact pressure

Fig. 8 P-V map

した試験片においては 14000 サイクルまで寿命が増加した。これは面取りを施していない場合においては、接触端において応力集中が発生することから比較的早く CNx 薄膜の剥離が剥離してしまったものと考えられる。

3.3 なじみが剥離に及ぼす影響

摩擦試験中摩擦係数が定常状態であると考えられる時に、荷重を 4.9 N づつ増加させていく、もしくはすべり速度を徐々に増加させていくことにより表面のなじみを行った。Fig. 5, Fig. 6 に溝を 4 本施したものにおいてなじみなしのものとなじみ過程を経たものの接触面圧と摩擦係数の関係、およびすべり速度と摩擦係数の関係を示す。Fig. 5 よりなじみをしていない場合においては接触面圧 0.15 MPa 程度で CNx 薄膜は剥離してしまったのに比べ、面圧を徐々に上げていった場合においては最大で 0.25 MPa 程度まで剥離荷重を増加させることが出来た。また同様に Fig. 6 より初期のすべり速度を 0.27 m/sec 程度とすると摩擦係数が 0.2 程度と高くなるのに比べ、なじみを経て徐々にすべり速度を上昇させていくことで 0.32 m/sec においても低摩擦を得られることが分かった。

4. 考察

Fig. 8 に 3.3 で示したなじみ過程を経た結果得られた種々の荷重及びすべり速度条件下における摩擦係数の分布を示す。A のラインは臨界剥離面圧を示す。A は面圧にのみ依存するものではなく摩擦をシステムとして考えるべきものであるため破線により示した。また摩擦係数の違いから B 及び B' を示し、これは PV 値に依存すると考えられる。本研究において実験を行った接触面圧及びすべり速度の範囲においては PV 値が高くなるほど摩擦係数は低くなる。この傾向は従来の潤滑法とは逆の傾向を示した。

PV 値の意味を摩擦によって発生する熱量であると考え、T. Le Huu ら^[5]が DLC 薄膜において真空中における sp³ 構造から sp² 構造へ変化するための臨界温度が 400℃であるのが DLC 薄膜に水素を付加することによりこの臨界温度が 127 - 167℃まで減少することが報告している。CNx 膜

においても PV 値が高くなることでより sp³ 構造が sp² 構造へ変化されやすくなりグラファイト状の構造に近い構造変化をすることで低摩擦が得られるのではないかと考えられる。

5. 結言

シリンダー / ディスク摩擦試験機による CNx 膜の平面接触での窒素ガス潤滑下における摩擦試験を行い摩擦係数 0.05 以下の低摩擦を得るための条件を明らかにした。得られた結果を以下に示す。

- ・ シリンダー試験片の内径部に沿ってエッジの面取りをすることにより被膜の剥離寿命を 4 倍に延ばした。
- ・ 荷重を徐々に増加させていくなじみ方法により臨界剥離面圧を約 2 倍増加させた
- ・ 平面接触における CNx 膜の窒素ガス潤滑下において摩擦係数 0.05 以下の低摩擦を発現させる荷重、すべり速度条件を実験的に明らかにした。

参考文献

- [1] 斎藤秀俊, ダイヤモンド膜から DLC 膜まで —その物性と構造—, トライボロジスト, 47, 11 (2002) 795-801.
- [2] A. Y. Liu, M. L. Cohen, Structural properties of new low compressibility solid, Science, 245 (1989) 841-842.
- [3] K. Adachi, T. Wakabayashi and K. Kato, The effect of sliding History on the Steady State Friction Coefficient between CNx Coatings under N₂ Lubrication, Manuscript for 31st Leeds-Lyon Symposium on Tribology 7th-10th September, 2004
- [4] 梅原徳次, 野老山貴行, 富田博嗣, 竹之下雪徳, CNx 膜をコーティングしたスラスト軸受の窒素中における超低摩擦現象, トライボロジー会議予稿集, 仙台, (2002-10) 79-80.
- [5] T. Le Huu, H. Zaidi, D. Paulmier, P. Voumard, Transformation of sp³ to sp² sites of diamond like carbon coatings during friction in vacuum and under water vapour environment, Thin Solid Films, 290-291 (1996) 126-130.