Ag-Cr ナノストライプ構造の真空中の摩擦特性

Friction properties of Ag-Cr nanostripe structure in vacuum environment

○ 阿部 俊介 (農工大) 正 安藤 泰久 (農工大)

Shunsuke ABE, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo
Yasuhisa ANDO, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo

In this paper, we examined the friction properties of the nanostripe structures consisted of soft and hard metals under dry condition. The nanostripe structure consists of Ag as soft metal and Cr as hard metal. We measured the friction force between Ag-Cr nanostripe structure and six counterparts (Mo, Ni, Ti, Si_3N_4 , Al_2O_3 , SUJ2) using a reciprocating friction tester in a vacuum of 2×10^{-4} Pa. Ag-Cr nanostripe structure that the ratio of Ag to Cr is 1 to 1 showed friction coefficient between 0.2 and 0.4. The friction coefficient of 0.2 was measured for Ag-Cr nanostripe structure that the ratio of Ag to Cr is 1 to 9. EDX (energy dispersive X-ray spectroscopy) observations showed that Ag deposit exist in the surface of nanostripe in the wear track.

Key Words: Nanostripe, Transfer film, Friction, Wear, Ag-Cr, Vacuum

1. 緒言

流体潤滑を適用できない人工衛星や真空内の機器では、固体潤滑剤によって摩擦や摩耗の低減が図られている⁽¹⁾。硬質金属上に軟質金属の薄膜を形成した表面を摩擦する場合、荷重を硬質金属が支え、せん断抵抗を軟質金属が受け持つために、摩擦係数が低くなることが知られており⁽²⁾、銀などの軟質金属の被膜が固体潤滑剤として利用されている。しかし、軟質金属被膜が摩耗したり剥離したりすると、固体潤滑剤としての機能が失われてしまうという問題がある。

筆者らはナノストライプ構造⁽³⁾を利用して、摩擦中に軟質金属の被膜を表面に形成する方法について検討を行っている⁽⁴⁾。本報告では、硬質金属 Cr の層間に、軟質金属 Ag の層を有するナノストライプ構造に関して、Ag と Cr の膜厚比を変えた時の摩擦係数への影響を真空中で調べるとともに、軟質金属が硬質金属を覆っているかについて、エネルギー分散型 X 線分析 (SEM-EDX) により検討を行った。

2. ナノストライプ構造

図 1 にナノストライプ構造の概略図を示す。ナノストライプ構造とは基板に周期的傾斜構造を作製し (図 1a)、2 種類以上の材料の膜を交互に積層させた表面構造であり (図 1b)、さらにその表面を研磨するとナノストライプ表面が得られる (図 1c)⁽³⁾。

本研究で用いたナノストライプ構造は、Si 基板上に等間隔でミクロンスケールの周期的傾斜構造を作製し、その上にスパッタ装置を用いて Ag と Cr を交互に成膜した。Si 基板上の周期的傾斜構造のピッチは $6 \mu\text{m}$ 、積層させる各金属の比率 (膜厚) は 1:1 (Ag:Cr=100nm:100nm)、1:9 (Ag:Cr=20nm:180nm) である。層数はすべての組み合わせで各 5 層 (トータルの膜厚は約 $1 \mu\text{m}$) とした。

本実験では、多層膜成膜後に基板の研磨は行わずに、図 1b と同様な断面形状のナノストライプ構造基板を摩擦実験に用いた。無潤滑で摩耗するような条件でナノストライプ構造基板を摩擦すると、研磨した時と同様にナノストライプ表面が現れ、そのとき硬質金属上に軟質金属が覆い薄膜が形成されれば、摩擦係数の低減が期待できる。一般的な固体潤滑剤の被膜と比較すると、摩耗しても連続的に軟質金属を含むナノストライプ表面が現れ、長寿命な固体潤滑技術が実現できる可能性がある。

3. 実験方法

摩擦実験にはピン (ボール) オンプレート型往復摩擦試験

を用いた。図 2 に真空チャンバー内に設置した試験機の主要部の概略を示す。ナノストライプ構造基板と摩擦させる摺動子として、ピンまたはボールを用いた。ピンの材質は Mo, Ni, Ti で、直径 4mm の丸棒の先端を球面状になるように研磨した。ボールの材質 (直径) は、 Si_3N_4 (9.5mm), Al_2O_3 (9.5mm), SUJ2 (10mm) で、いずれも転がり軸受用の球である。摩擦試験時の荷重は 0.5~2.5N、摩擦速度 5mm/s で摺動した。その時の 1 往復あたりの摩擦距離は 10mm に設定した。往復摩擦回数 1000 回 (トータルの摩擦距離 10m) まで摩擦を行い、その間の摩擦力と垂直荷重を記録した。

Ag と Cr の比率が 1:1 の Ag-Cr ナノストライプ構造基板に関しては、摺動子が Si_3N_4 ボールの時、ナノストライプの縞に対して平行方向にも摩擦を行った。それ以外の摺動子は、全てナノストライプの縞に対して直交方向に摩擦を行った。

測定環境は、 2.0×10^{-4} Pa 以下の真空中であり、排気はスクロールポンプとターボ分子ポンプで行った。

Fig.1 Nanostripe structure

Fig.2 Schematic of main part of friction tester

なお、Ag と Cr の比率が 1:1 の Ag-Cr のナノストライプ構造基板に関して、 Al_2O_3 ボールで摩擦を行った後の表面を SEM-EDX で摩擦面上の元素を分析した。

4. 実験結果

Ag と Cr の比率が 1:1 の Ag-Cr のナノストライプ構造基板の摩擦試験結果を図 3 に、Ag と Cr の比率が 1:9 の摩擦試験結果を図 4 にそれぞれ示す。Ag と Cr の比率が 1:1 の場合は、往復回数 200 回ほどで摩擦係数が 0.2~0.4 程度で安定した (図 3)。一方、Ag と Cr の比率が 1:9 のナノストライプ構造基板では、摩擦係数は約 0.2 まで低下した (図 4)。図 5 では、ストライプの縞に対して直交方向と平行方向に摩擦を行った時の摩擦係数を比較している。ストライプの縞に対して平行方向に摩擦を行った時では、往復摩擦回数 400 回まで摩擦係数は 0.6 以上を記録し、真空中の摩擦試験では最も高い値を示した。

図 6 は、比率 1:1 の Ag-Cr のナノストライプ構造基板を Al_2O_3 ボールで摩擦した表面について、SEM-EDX で元素密度分布を調べた結果である。図 6a より、摩擦面には堆積物が存在していることが確認できる。Ag の分布 (図 5b) と比較すると、堆積物と Ag の分布が一致している。一方、Cr の分布 (図 6c) をみると、Ag の密度が高い場所では、Cr の密度が低くなっている。また、Cr の分布 (図 6c) と O の分布 (図 6d) を比較すると、それぞれの分布が一致している。

5. 考察

Ag-Cr のナノストライプ構造は真空中で摩擦を行うと、摩擦係数が低くなる傾向を示す。SEM-EDX 分析では、堆積物の箇所では Ag が検出されていることから、Ag-Cr ナノストライプ構造を摩擦すると、軟質金属である Ag の堆積物が表面に形成されることで、摩擦係数が低下したと考えられる。

図 3 と図 4 を比較すると、Cr に対する Ag の比率が小さい時、摩擦係数が低下している。その理由として、Ag の比率が小さいと摩耗により摩擦面現れる Cr の面積が広く、Cr 上の Ag 薄膜による低摩擦面の割合が高くなったため、摩擦係数が低下したと考えられる。

ストライプの縞に対して平行方向に摩擦した時の摩擦係数は、直交する方向に摩擦した時と比較して、往復摩擦回数 400 回程度まで高くなっている (図 5)。この理由として、ストライプの縞に沿って摩擦しているため、軟質金属の Ag が硬質金属の Cr 上に堆積しにくい。そのため、直交方向の摩擦と比較して、摩擦係数の低下に多くの摩擦回数を要した。

6. 結言

周期的傾斜構造をもつ Si 基板上に Ag と Cr を組み合わせたナノストライプ構造を作製し、Mo, Ni, Ti, Si_3N_4 , Al_2O_3 , SUJ2 の球面状試験片を用いて、真空中で摩擦を行ったところ以下のことが明らかになった。

- (1) Ag と Cr の比率が 1:1 の場合、摩擦係数は摩擦距離と共に低下し、摩擦係数は 0.2~0.4 の間で安定した。
- (2) Ag と Cr の比率が 1:9 の場合、摩擦係数は 0.2 程度で安定した。
- (3) ストライプの縞と平行に沿って摩擦した時、400 回程度の往復摩擦まで 0.6 以上の高い摩擦係数を示した。
- (4) Ag-Cr のナノストライプ構造を SEM-EDX で分析し、摩擦面には Ag の堆積物が分布していることを確認した。

参考文献

- (1) M. R. HILTON and P. D. FLEISCHAUER, AEROSPACE REPORT, F04701-88-C-0089.
- (2) H. Olsson, K.J. Åström, C. Canudas de Wit, M. Gäfvert, P. Lischinsky, European Journal of Control, Volume 4(1998), 176-195.

- (3) Y. Ando, K. Miyake, A. Mizuno, A. Korenaga, M. Nakano and H. Mano, Nanotechnology, Vol. 21(2010), 095304.
- (4) 柴田 恭兵, 安藤 泰久, 学生員卒業研究発表講演会, 41(2012), 0609.

Fig.3 Friction coefficient for Ag-Cr(1:1) nanostripe

Fig.4 Friction coefficient for Ag-Cr(1:9) nanostripe

Fig.5 Friction coefficient for Ag-Cr(1:1) nanostripe rubbed with Si_3N_4 ball

(a) SEM photomicrographs (b) Elemental mapping of Ag
(c) Elemental mapping of Cr (d) Elemental mapping of O
Fig.6 Elemental mapping result of SEM-EDX for Ag-Cr(1:1) nanostripe sample rubbed with Al_2O_3 ball