129 粒子分散複合めっきの真空中トライボ性能

Tribological Performance of Particle Dispersed Composite Plating in High Vacuum

正 吉田 彰 (岡山大) ○ 正 藤井 正浩 (岡山大)

Akira YOSHIDA, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-Naka, Okayama

Masahiro FUJII, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-Naka, Okayama

Roller test and ring/disk test were carried out under non-lubricating condition in high vacuum to investigate the tribological performance of particle dispersed composite platings based on electroless Ni-P alloy. Three kinds of composite platings, in which PTFE particles, BN particles, and SiC particles were dispersed, were employed. The wear rate of both plated layers with BN particles and with PTFE particles increased with increasing content of dispersed particles. The wear rate of the layer with PTFE particles was greater than that with BN particles. The influence of elastic modulus of dispersed particles on stresses in the plated layer was investigated with FEM analysis. The maximum values of Mises stress in the plated layer increased with increasing particle content and with decreasing elastic modulus of particles. The wear behavior obtained in the experiment could be well explained by the calculated stress field.

Keywords: Wear, Friction, Composite plating, Particle dispersion, FEM analysis

1. 緒言

半導体製造設備や航空宇宙分野で使用される機械要素は、無潤滑や真空といった極めて厳しい環境で使用される。このような環境下で機械要素の接触表面の摩擦・摩耗特性を向上させる方法のひとつとして表面改質処理がある。

本研究では油潤滑下でよく使用される無電解めっきを真空環境下で使用される動力伝達機械要素へ適用する可能性を検討した。無電解めっきは複雑な形状でも均一な膜厚を得ることができ、また無電解 Ni めっきではめっき後の熱処理により高硬度の改質層を得ることが可能である。さらに、自己潤滑性を有す PTFE や高硬度の SiC のような微細粒子をめっき層に分散析出させた複合めっきでは、改質層の摩擦・摩耗特性の改善も期待される。

本報では、粒子分散複合めっきの真空中のトライボ性能をローラ試験およびリング・ディスク試験で調べた結果を報告する。

Table 1 Specifications of modified layer in roller test

	Ni-P	Ni-P+ PTFE (L)	Ni-P+ PTFE (S)	Ni-P+ BN (H)	Ni-P+ BN (M)	Ni-P+ BN (L)
Thickness of plated layer μm	13	←	←	←	←	←
Content of particles vol%	—	5	23	10	13	20
Hardness <i>HUT</i> [*]	567	404	311	533	451	444
Heat treatment	673K ×1h	573K ×1h	623K ×1h	673K ×1h	←	←

^{*}*HUT* Dynamic hardness measured with the trigonal pyramid indenter to make an angle of 68° between the axis and a lateral face

Table 2 Specifications of modified layer in ring/disk test

	Ni-P	Ni-P+ PTFE (B)	Ni-P+ PTFE (A)	Ni-P+ PTFE (S)	Ni-P +SiC
Thickness of modified layer μm	13	←	←	←	←
Content of particles vol%	—	5	20	30	10-20
Hardness <i>HUT</i>	550	544	369	222	459
Heat treatment	573K ×1h	←	←	←	←

Fig.1 Observations of dispersed particles

2. 粒子分散複合めっき

表1, 2は、それぞれローラ試験およびリング・ディスク試験に用いた粒子分散複合めっきの諸元を示す。PTFE粒子、BN粒子およびSiC粒子は、無電解Ni-Pめっき中に分散された。改質層の硬さは、薄膜硬度計を用いて圧子の押し込み深さを約1 μm に制御して、測定された。図1は、ローラ試験片に施した粒子分散複合めっきの粒子分散状態を示す。表1の粒子含有率は図1の改質層表面のSEM写真を画像解析して求められた。粒子分散複合めっき処理は研削仕上げ後の試験片に施された。

3. 試験片および試験方法

3.1 ローラ試験

図2は、それぞれローラ試験片およびリング・ディスク試験片の形状および寸法を示す。材質はいずれもSUS440Cで焼入れ焼戻し後に研削仕上げされた。

Faster roller Slower roller

Fig.2 Shapes and dimensions of test rollers

Fig.3 Specific wear rate $Wr/p_{\max}$ and friction coefficient μ in roller test

ローラ試験は、同じ表面改質処理を施したローラを組み合わせて、ヘルツの最大接触圧力 0.8GPa、すべり速度、平均転がり速度、 10^{-4} Pa オーダーの真空度、室温無潤滑条件下で行われた。

3.2 リング・ディスク試験

リング・ディスク試験には、内径 20mm、外径 25.6mm、高さ 15mm のリングが用いられた。材質は SUS440C で焼入れ焼戻し後、研削仕上げされた。

実験は、同じ表面改質処理を施したリングとディスクを組み合わせて、すべり速度 0.02m/s、接触圧力 0.5MPa、 10^{-4} Pa オーダーの真空度の条件で、試験片温度 T を室温および 473K として行われた。

4. 実験結果および考察

図 3 は、ローラ試験の結果を示す。摩擦係数は、摩擦が改質層内に留まっているすべり距離での平均値と変動範囲を示す。比摩耗量は、高・低速両円筒の質量減少量の和をすべり距離とヘルツの最大接触圧力 $p_{\max}$ で除して求めた。全般的に粒子を分散させることにより摩擦は増大している。また、分散粒子の種類により摩擦係数の値に大差ないが、PTFE 粒子を分散させた場合のほうが BN 粒子を分散させた場合より摩擦が大きい。

図 4 は、リング・ディスク試験の結果を示す。室温の場合に比べて $T=473$ K では、PTFE 粒子含有率の増大に伴う摩擦係数の低下が顕著である。また、粒子含有率 5~20% 程度では、室温の場合の比摩耗量は大きくないが、 $T=473$ K では、摩擦に及ぼす粒子含有率の影響が顕著である。Ni-P+SiC の摩耗は粒子含有率が近い Ni-P+PTFE(A) より大きい。

本研究では、めっき層内の分散粒子の粒子径と含有率がめっき層内の応力に及ぼす影響を FEM 解析により調べた。

Fig.4 $Wr/p_{\max}$ and μ in ring/disk test Fig.5 Maximum Von Mises stress $(\sigma_{\text{Mises}})_{\max}$ in roller test

二次元弾性接触問題として解析するため、実験に用いたローラの接触状態とは異なるが、線接触状態を仮定した解析モデルを用いた。なお、粒子は円形と仮定し、ヘルツの接触幅の 1/10 の範囲にのみ分散させた⁽¹⁾。

図 5 は、粒子のヤング率を BN 粒子に相当する 60GPa⁽²⁾ および PTFE 粒子に相当する 0.35GPa⁽³⁾ として計算された改質層内の Von Mises 応力の最大値 $(\sigma_{\text{Mises}})_{\max}$ を示す。接触表面の摩擦係数は 0.4 とした。粒子含有率は 5, 10 および 23% として計算された。改質層の $(\sigma_{\text{Mises}})_{\max}$ の値は、BN 粒子を分散させた場合より PTFE 粒子を分散させた場合のほうが大きい。また、粒子含有率が大きいほど $(\sigma_{\text{Mises}})_{\max}$ の値は大きい。この傾向は、図 3 に示した比摩耗量の大小関係と一致しており、 $(\sigma_{\text{Mises}})_{\max}$ の値が大きいほど摩擦が大きい。改質層の強度で摩擦の大小を評価し得るといえる。

5. 結言

- (1) PTFE 粒子および BN 粒子の含有量の増大に伴い、摩擦係数は減少したが、粒子分散複合めっきの摩擦は増えた。
- (2) 粒子分散複合めっきの摩擦・摩耗挙動に及ぼす粒子含有率の影響は高温環境下で顕著であった。
- (3) 粒子分散複合めっきの摩耗挙動は改質層内の応力で説明された。

参考文献

- (1) 吉田 彰, 藤井正浩, 上路嘉隆, 機講論, No.015-1, 325.
- (2) Shackelford JF, editor. Materials science and engineering handbook. CRC Press. 1994.
- (3) Ashby MF. Materials selection in mechanical design. Pergamon Press. 1992.