

複合表面改質した合金工具鋼のアルミニウム合金とのしゅう動における TiN 被膜の寿命向上*

河村新吾^{*1}, 春山義夫^{*2}, 横井信安^{*2}
木村好次^{*3}, 塩澤和章^{*4}

Life Improvement of TiN Film Prepared by Duplex Treatment on Alloy Tool Steel Sliding Against Aluminum Alloy

Shingo KAWAMURA^{*5}, Yoshio HARUYAMA, Nobuyasu YOKOI,
Yoshitsugu KIMURA and Kazuaki SHIOZAWA

^{*5} YKK Corporation, Machinery Head Quarters, Yoshida 200, Kurobe, Toyama, 938-8601 Japan

Following to a study on tribological properties of a duplex surface treatment of tool steel, which comprises nitriding of a substrate and coating of a titanium nitride (TiN) layer, effects of tempering of the substrate are studied by sliding experiments against aluminum alloy without lubrication. Experiments are carried out under a high-load, low-speed condition, where wear takes place predominantly. Results show that the tempering prolongs the film life more than twice. This is caused by increased fracture toughness of the substrate and improved adherence at the coating-substrate interface by formation of a high-titanium layer, both suppressing wear of the TiN layer by scratching.

Key Words: Wear, Surface treatment, Coating, Nitriding, Alloy Tool Steel, Aluminum Alloy, Duplex Surface Treatment, TiN Coating, Plasma Nitriding, Tempering

1. 緒 言

アルミニウム合金の塑性加工工具への応用を目的として、工具鋼基材の窒化と窒化チタン(TiN)硬質膜の被覆を組合せた複合表面改質の開発を進めている。

前報では、無潤滑のリング・オン・ブロック摩擦摩耗試験を行い、図1のように、荷重とすべり速度によって摩耗領域と移着領域に区分されること、摩耗領域の典型的な低荷重・低速条件では、同じ TiN 被膜であっても、窒化によって硬さを高めた基材にコーティングした複合改質材が、優れた耐摩耗性を示すことを報告した⁽¹⁾。

しかし図1の摩耗量と荷重・すべり速度との関係を見ると、移着領域に近い高荷重・低速条件では複合改質材でも摩耗量が比較的大きくなり、実際の工具に用いた場合に、必ずしも満足できる被膜寿命が得られないおそれがある。そこで本稿では、複合改質材の耐摩耗性をいっそう向上させるために、基材表面に熱処理

を施した効果について報告する。

2. 試 験 片

試験片は、前報⁽¹⁾で用いたものと同様の、硬さ HRC 47±1 の合金工具鋼 SKD 61 [化学組成 (mass%): 0.38 C, 0.98 Si, 0.41 Mn, 0.009 P, 0.001 S, 5.08 Cr, 1.36 Mo, 0.85 V, Bal. Fe] で作った、一辺 40 mm, 厚さ 10 mm の正方形のブロックであり、鏡面研磨した 40 mm 平方の面にまずプラズマ光輝窒化処理を行った。窒化処理を行った面の硬さ

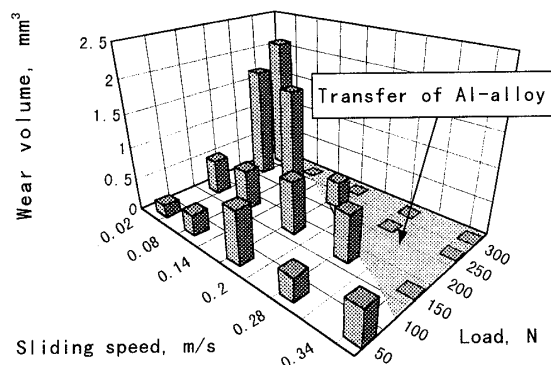


Fig. 1 Change in wear amount with load and sliding speed

* 原稿受付 1999年8月26日。

*¹ 正員, YKK株式会社(☎938-8601 黒部市吉田200)。

*² 正員, 富山県立大学(☎939-0398 富山県射水郡小杉町黒河5180)。

*³ 正員, 香川大学(☎760-8526 高松市幸町1-1)。

*⁴ 正員, 富山大学(☎930-8555 富山市五福3190)。

Table 1 Surface roughness and surface hardness of the substrate

| Code | Tempering time, hr | Surface roughness R_y , μm | Surface hardness of the substrate, HV (0.98N) |
|----------|--------------------|---|---|
| DM-2-0 | 0 | 0.09 | 1034 |
| DM-2-0.5 | 0.5 | 0.08 | 952 |
| DM-2-2 | 2 | 0.09 | 890 |
| DM-2-4 | 4 | 0.08 | 848 |
| PN-0-0 | — | 0.07 | 1144 |
| IP-2-0 | — | 0.07 | 482 |

は、最高HV 1000を越えている。

このような基材表面の硬さが、TiN被膜の見かけ上の付着強度を高め、さらに基材内部へのクラックの進展を抑えることにより、複合改質材の良好な耐摩耗性をもたらしたものと、前報で考察した⁽¹⁾。このうち、見かけ上の付着強度を高めるには硬さが高いほど好都合であるが、基材内部のクラックの進展は破壊靱性によって支配される。そこで今回は、基材の表面硬さをあまり下げずにその破壊靱性を高めることを試みた。すなわち窒化処理後の基材を、温度823 Kの水素雰囲気中で0.5、2または4時間焼戻した後、前報の複合改質材と同様のHCDイオンプレATING法によって、厚さ2.5 μm のTiN膜を被覆した。表1に示すように、これらをそれぞれDM-2-0.5、DM-2-2、DM-2-4と呼ぶことにする。はじめの数字が μm 単位によるTiN膜の厚さの概略値、その後の数字が焼戻し時間である。なお比較のために、焼戻しを行っていない複合改質材DM-2-0、基材にプラズマ光輝窒化処理のみを行った試験片PN-0-0、基材の窒化を行わずに複合改質材と同一のバッチで厚さ2.5 μm のTiN膜を被覆した試験片IP-2-0をも用いている。表1に、これらの表面粗さをも併せて示す。

ブロックとしゅう動するリング試験片は、前報と同じアルミニウム合金A 6063 [化学組成(mass%) : 0.42 Si, 0.18 Fe, 0.01 Cu, 0.01 Mn, 0.50 Mg, 0.01 Cr, 0.01 Zn, 0.01 Ti, Bal. Al] 製である。

3. 各改質面の性質の測定

各改質面の基本的性質として、TiN膜表面の硬さ、TiN膜の付着強度、基材の硬さおよび破壊靱性について調べた。さらにX線による被膜の残留応力、オージェ電子分光による界面付近の元素分布についても調べた。

3.1 TiN膜の硬さ 前報⁽¹⁾では準備が間に合わなかったが、今回は超微小硬度計(島津DUH-201S)

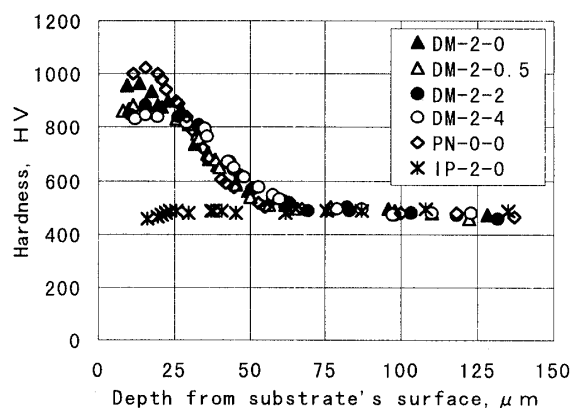


Fig. 2 Hardness distribution in the substrate; measurement load: 0.98 N

を用い、ビッカース圧子の押し込み深さが膜厚の1/10以内であり、基材の影響を受けない荷重 4.9×10^{-2} N、保持時間10秒の条件で、TiN膜自体の硬さを測定した。圧子押し込み時の深さから測定したTiN膜の硬さの値は、いずれの試験片も約HV 3700であった。この値は前報で推定した値HV 2500⁽¹⁾、あるいは報告されている荷重0.245 Nでの測定値HV 2800⁽²⁾に比べ幾分高いが、TiN膜の場合は圧痕の大きさが測定値に影響し、圧痕が小さくなるほど硬さは高くなるとされており⁽³⁾、この影響が今回の測定値に現れたものと考えられる。

3.2 基材の硬さ 各改質材について、はく離剤によってTiN膜を除去して測定した基材表面の硬さを表1に、断面の測定によって得た内部の硬さを図2に、それぞれ示す。

これらの結果からわかるように、焼戻しによって、表面から深さ約25 μm までは、硬さがHVの値で最大150程度低下している一方、深さ25~70 μm の範囲では逆に多少上昇している。これは加熱によって窒素の濃度分布が平坦化され、一部は表面から離脱し、一部はさらに内部に拡散したためと考えられる。

3.3 破壊靱性の評価 各改質材の破壊靱性の定

性的な評価を、圧子の押し込み試験によって行った。圧子としては曲率半径 200 μm のロックウェルダイヤモンド圧子を用い、147, 294, 441, 588, 981, 1471 N の各荷重を 2 秒間加えたのち、圧痕の周囲に形成されるクラックの様子を調べた。

結果の代表例を図 3 に示す。DM-2-0 の結果を見ると、改質面の圧痕の周囲には円弧状のクラックとラジアルクラックが認められる。しかし焼戻し時間の増加に伴って、DM-2-4 の結果に見られるように、これらのクラックの数は少なくなり、その大きさも小さくなっている。この特徴は、TiN 膜除去後の基材表面について行った同様の押し込み試験の結果と共通している。また、改質面にこれらいずれかのクラックが発生した最小荷重は、表 2 に示したように、焼戻し時間の増加とともに大きくなっている。

これらの結果から、複合改質面の破壊靱性が焼戻しによって向上しており、それが基材の破壊靱性の向上によるものであることがわかる。

3.4 スクラッチ試験 スクラッチ試験は、前報⁽¹⁾と同様 CSEM 製の試験機(REVETEST)により、先端曲率半径 200 μm のダイヤモンド圧子を用いて、試験片移動速度 10 mm/min、荷重負荷速度 100 N/min、最大負荷荷重 100 N の標準条件で行った。表 3 に、アコースティック・エミッションによって検出した、各複合改質材の膜の破壊する臨界荷重 L_c と、 L_c

Table 2 Minimum indenting load at which cracks appear

| Specimen | Load, N |
|----------|---------|
| DM-2-0 | 294 |
| DM-2-0.5 | 441 |
| DM-2-2 | 588 |
| DM-2-4 | 588 |

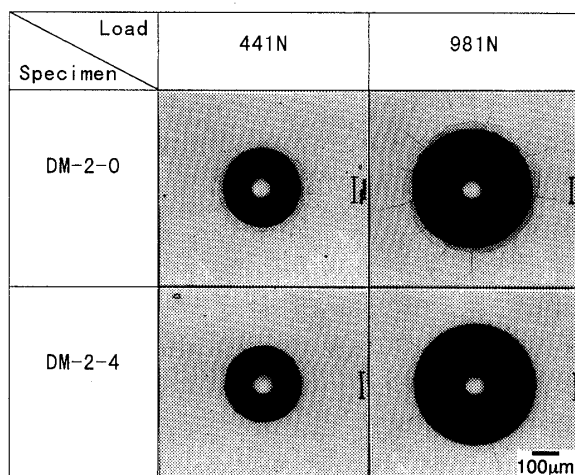


Fig. 3 Fracture patterns after indentation

付近および最大荷重 100 N 付近での、電子顕微鏡で観察したスクラッチ条痕を示す。なお、表の L_c の欄に併記した AE-I, AE-II の記号は、 L_c の検出方法、破壊のモードを、日本機械学会基準⁽⁴⁾に基づいて示したものである。

表 3 から、焼戻しによる臨界荷重の増加が認められる。窒化層の有無による違いほど大きな差ではないが、DM-2-0 に比べて DM-2-2 では 9%、DM-2-4 では、16%ほど L_c が高くなっており、見かけ上の付着強度が増加していることがわかる。次に臨界荷重付近のスクラッチ条痕の写真をみると、まず条痕内部の円弧状のクラックはいずれも圧子の進行方向に曲率中心を持っていて、付着強度が高いことを示している。また最大負荷荷重付近では、DM-2-0.5 から DM-2-2、さらに DM-2-4 へと、焼戻し時間の増加とともにクラックの数が減少しており、付着強度の増加を裏書きしている。その代わり DM-2-2 と DM-2-4 では、臨界荷重付近でクラックとともに条痕の周囲に微小なチップングが観察されている。

3.5 TiN 膜内の残留応力 TiN 膜の残留応力の状態が、基材の焼戻しによって変化するかどうかを調べるため、X 線回折による応力測定を行った。

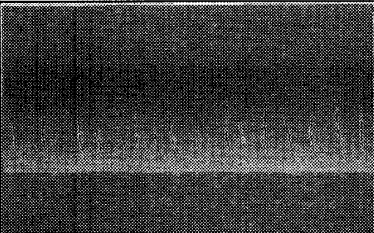
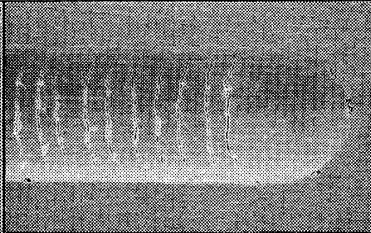
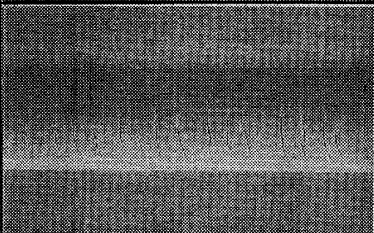
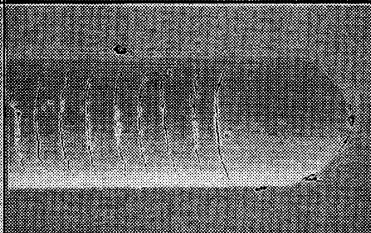
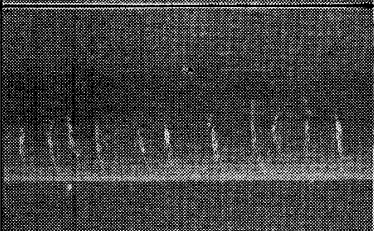
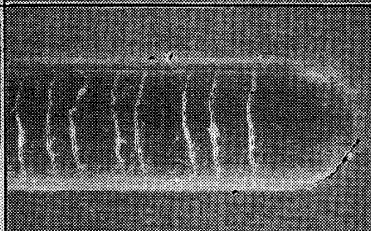
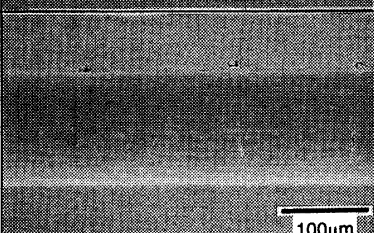
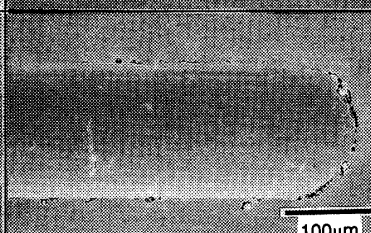
一般に配向性のある被膜の残留応力の測定は、通常の $\sin^2 \psi$ 法ではむずかしいといわれている⁽⁵⁾。本研究の TiN 膜も [111] 軸に優先配向しているが、(311) 回折面では $2\theta - \sin^2 \psi$ に比較的よい直線関係が得られたため、この回折面から $\sin^2 \psi$ 法より応力測定を行った。なお特性 X 線には Cr-K α 線を用い、 ψ_0 一定法によった。

その結果、焼戻しの有無・焼戻し時間による違いはほとんどなく、複合改質材の TiN 膜の残留応力は約 2.7 GPa の圧縮応力であった。この値は IP-2-0 の TiN 膜の値 3.1 GPa よりも少し低い。

3.6 界面付近の元素分布 各ブロック試験片と同様の焼戻しを行った基材上に、厚さ約 500 nm の薄い TiN 膜を形成し、特に TiN 膜と基材との界面付近に注目して、オージェ電子分光により各元素の深さ方向の分布を調べた。測定にはシングルパス CMA を用い、電子ビームは加速電圧 10 kV、電流 1 μA 、ビーム径約 100 μm である。またスパッタエッチングにはアルゴンを用い、加速電圧 2 kV、圧力 2×10^{-2} Pa の条件で行った。

Ti(LMM, 419 eV), Ti+N [LMM(Ti) および KLL(N), 383 eV], Fe(LMM, 702 eV) のオージェピークの、相対的な高さの深さ方向の変化の代表例として、DM-2-0 と DM-2-2 の結果を図 4 に示す。成膜

Table 3 L_c values and scratch traces of surface-treated specimens

| Specimen | L_c , N | Scratch traces | |
|----------|--------------|---|--|
| | | Around the load of L_c | Around the final load |
| DM-2-0 | 6.7 AE-I |  |  |
| DM-2-0.5 | 6.7 AE-I |  |  |
| DM-2-2 | 7.3 AE-II |  |  |
| DM-2-4 | 7.8 AE-II |  |  |

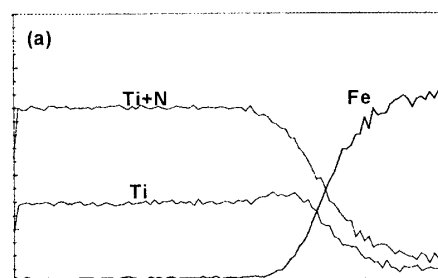
過程で意図したわけではないが、図4(b)に見られるように、DM-2-2では界面にチタンの濃度の高い層が形成されている。同様の層はDM-2-4の場合にも認められた。これに対し図4(a)に示すDM-2-0およびDM-2-0.5では、わずかに界面でチタン濃度が高くなっているだけであった。

DM-2-2, DM-2-4に特徴的に見られたこの変化は、3.2節でも述べたように、界面近くの窒素が焼戻し時の加熱によって拡散し、相対的にその濃度が低下したために生じたものと考えられる。

4. しゅう動特性の評価および考察

4.1 実験 しゅう動試験には、前報⁽¹⁾と同じリング・オン・ブロック型摩擦摩耗試験機を用いた。リングは内・外径がそれぞれ20, 25.6 mmの、前述した組成のアルミニウム合金A 6063-T5であり、ブロックは前述の試験片である。

今回の試験条件は、移着領域に近い摩耗領域内の高



(a) DM-2-0

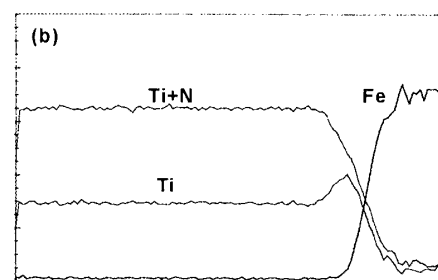
Sputtering time, min
(b) DM-2-2

Fig. 4 Depth profiles showing chemical composition near interface

荷重・低速条件として、荷重 250 N, すべり速度 0.1 m/s を選び、前報と同様、温度 20~25°C, 相対湿度 45~60% の大気中、無潤滑下で行った。

摩耗重量および体積は、前報と同様にブロックについてのみ求めることとし、試験後しゅう動面上に移着している摩耗生成物を 10% の NaOH 水溶液で溶解除去したのち試験片の重量を測定し、試験前後の重量変化によって求めた。ただし後に述べる基材を主体とする摩耗への移行後は、ただか 0.3 mg 程度であった移着量と比べ摩耗量がおおよそ 1 けた以上大きかったため、移着物の溶解除去を行わずにそのまま重量変化を測定した。後掲する図 6 の摩耗量は、このようにして各改質材につきそれぞれ 1 個の試験片を用い、摩耗の進行を順次測定した結果である。

摩耗重量測定後、ブロックしゅう動面をノマルスキー微分干渉顕微鏡、走査型電子顕微鏡により観察して微視的な損傷形態を調べ、さらに摩耗粉について、走査型電子顕微鏡により形状を、エネルギー分散 X 線分析により成分を、それぞれ調べた。

4.2 しゅう動特性

4.2.1 膜寿命 各改質材の摩耗量のすべり距離に伴う増加を、図 5, 6 に示す。

TiN の被膜をもつ複合改質材の摩耗量とすべり距離の関係は、初期の、主として TiN 膜の摩耗を示す

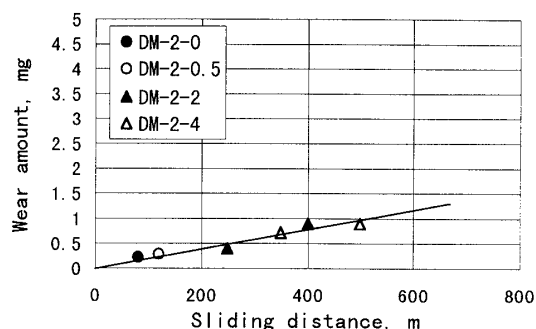


Fig. 5 Wear of specimens with TiN film

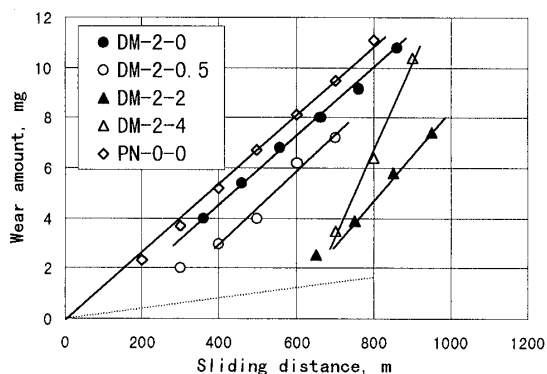


Fig. 6 Wear of specimen substrates

直線から、あるすべり距離を起えると、主として基材の摩耗を示すはるかに大きいこう配をもつ直線に移行する。前者は、図 5 に示すように 1 本の直線に乗っていて、複合改質材相互の差は小さく、摩耗速度で 2.0×10^{-3} mg/m, 比摩耗量にして 1.5×10^{-6} mm³/N·m であった。また、プラズマ光輝窒化処理のみの改質材 PN-0-0 の場合は、摩耗速度で 13.5×10^{-3} mg/m, 比摩耗量にして 6.9×10^{-6} mm³/N·m であった。TiN 被覆材 IP-2-0 の場合には、すべり距離と摩耗量との間にあまりよい直線関係が得られず、再現性もよくなかったが、比摩耗量にして PN-0-0 と同等もしくはそれ以上であった。プラズマ光輝窒化処理のみの改質材 PN-0-0, 窒化処理をしていない TiN 被覆材 IP-2-0 に比べて、主として TiN 膜の摩耗を示す範囲の複合改質材の比摩耗量は約 1/5 となっている。

摩耗とすべり距離の関係は、ある距離すべったところで主として TiN 膜の摩耗を示す直線からずれ、主として基材の摩耗を示す直線に移行する。移行部の変化の詳細はもっと細かくデータを取らないとわからないが、すべり距離の増加に伴い TiN 膜主体の摩耗から基材主体の摩耗に変化していくものと考えられる。基材主体の摩耗に移行する点は、摩耗痕内で均一に摩耗が生ずると仮定した場合に TiN 被膜が消失する点、すなわち摩耗量 2.7 mg を越えた後に現れる。しかし、この点を実験的に正確に求めることは困難であり、また本研究の対象とする金型・工具では、製品品質の観点から摩耗量がある値以上に達すると寿命と判断される場合が多いことから、ここでは移行後のデータから基材の摩耗特性を表す直線を定め、その直線上で摩耗量が 2.7 mg となるすべり距離として、TiN 膜の寿命を定義することにする。

各改質材について、この定義による膜の寿命と基材を主体とする部分の比摩耗量を、表 4 に示す。この表からわかるように、膜の寿命と基材主体の比摩耗量は、複合改質材によって大きく異なっている。すなわち、

Table 4 The TiN film life and wear rate of the specimen substrates

| Specimen | TiN film life, m | Specific wear rate, 10^{-6} mm ³ /N·m |
|----------|------------------|--|
| DM-2-0 | 270 | 7.0 |
| DM-2-0.5 | 370 | 7.2 |
| DM-2-2 | 670 | 9.0 |
| DM-2-4 | 680 | 17.5 |
| PN-0-0 | — | 6.9 |

焼戻し処理によって膜の寿命は長くなり、2時間以上の焼戻しによって寿命は2倍以上に延びている。ただし基材の摩耗速度は焼戻し時間とともに高くなっているが、膜が寿命に達した後の摩耗は実用上問題にならない。

4・2・2 摩擦係数および摩耗粉 すべり距離の増加に伴う摩擦係数の変化の一例を、図7に示す。いずれの複合改質材も膜寿命までは摩擦係数は0.31~0.46、平均値0.36程度の比較的低い値を示す

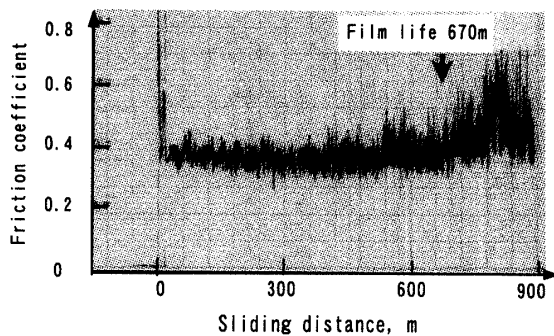


Fig. 7 Friction coefficient vs sliding distance ; specimen : DM-2-2

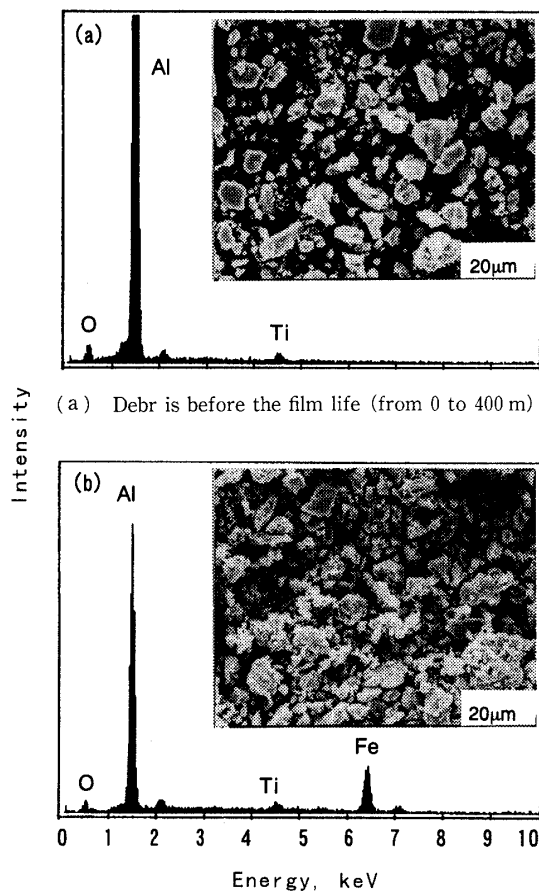


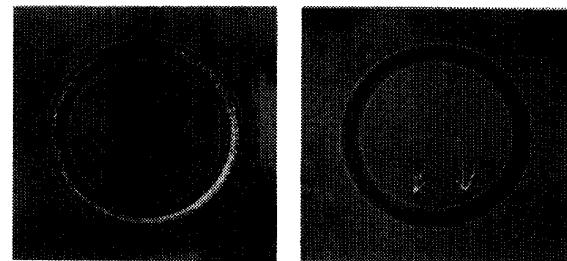
Fig. 8 Scanning electron micrographs and EDS spectra of wear debris ; specimen : DM-2-2

が、膜寿命付近から増加しはじめ、0.38~0.76、平均値0.55と、PN-0-0と同程度の摩擦係数となった。このように、TiN膜は基材に比べて低く安定した摩擦を示すことがわかる。なおIP-2-0の摩擦係数は0.3~0.55の範囲にばらつき、平均値にあまり再現性が見られなかった。

発生した摩耗粉は、図8(a), (b)に一例を示すように、膜寿命前後で形状はあまり変わらないが、EDS分析の結果から、寿命前に見られるアルミニウム、酸素およびチタンに加え、寿命後には鉄が顕著に認められている。

4・2・3 損傷形態 図9に、300mしゅう動した後の、DM-2-0およびDM-2-4の損傷状況を、図10にDM-2-4の摩耗痕の一部を拡大したものを示す。

前報⁽¹⁾に述べた低荷重・低速条件では、摩耗領域における損傷形態として、微小な貝殻状のチッピングと、それより規模の大きいスクラッチ損傷が認められた。後者はすべり方向と直角なクラックを起点とし、膜と基材の界面および基材内部へ進展するクラックによって比較的大きな剥離を生じ、そのアブレイブ作用で摩耗が進行するというものであった。低荷重・低速においては、複合改質材にはスクラッチ損傷が発生せ



(a) DM-2-0 (b) DM-2-4

Fig. 9 Wear tracks on blocks slid for 300 m

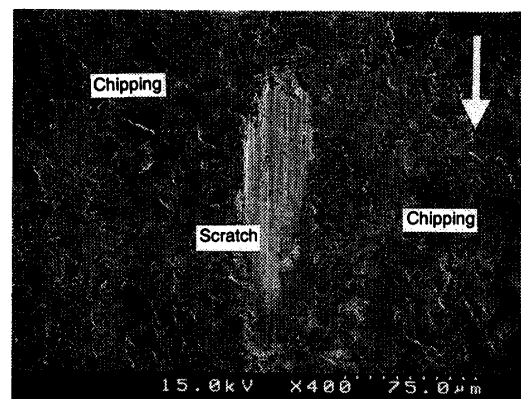


Fig. 10 Representative failures, the chipping and the scratch ; specimen : DM-2-4, sliding distance : 300 m The arrow indicates the sliding direction

ず、これがその優れた耐摩耗性をもたらしていると考えた。

しかしながら、今回の高荷重・低速の条件では、図10にその例を示すように、複合改質材においても同図の全面に見られるチッピングとともに、中央部に見られるスクラッチ損傷が発生した。それによって図9に見られるように基材が露出したが、ここには焼戻し時間の影響が認められる。すなわち、DM-2-0では、このすべり距離でスクラッチ損傷がすでにしゅう動面のほぼ全周に拡大し、基材が露出しているのに対し、DM-2-4ではスクラッチ損傷が少なくかつその規模も小さく、基材の露出はDM-2-0に比べて少ない。なお、DM-2-0.5はDM-2-0に、DM-2-2はDM-2-4に近い損傷状況であった。

基材の受けた損傷を調べるために、120 m しゅう動した後のDM-2-0とDM-2-4のしゅう動面からTiN膜を除去して観察した結果を図11に示す。いずれの試験片にも、低荷重・低速条件では複合改質材には見られなかった、すべり方向と直角のクラックが生じて

おり、前報のTiN被覆のみを行った試験片の場合と同様に、これがスクラッチの起点になっていると考えられる。図11の(a)と(b)を比べると焼戻し時間の影響は明らかで、図11(a)のDM-2-0ではしゅう動面のほぼ全面にわたってクラックが多数見られるのに対し、(b)のDM-2-4ではその数ははるかに少ない。

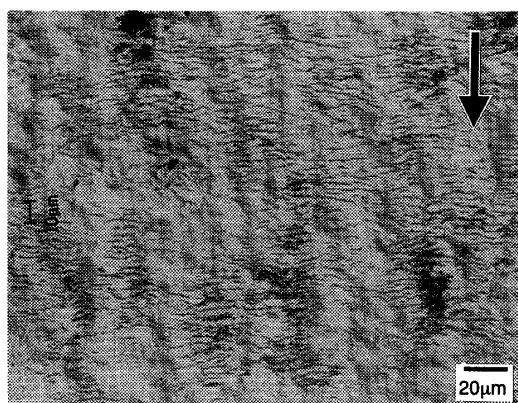
このように、焼戻しによる基材の破壊靱性の向上が、クラックの基材への進展を妨げ、それによってスクラッチ損傷が抑制されたものと考えられる。

4・2・4 TiN膜の付着強度 次に、TiN膜の基材への付着強度を考える。スクラッチ試験の結果には、焼戻しによって臨界荷重 L_c の増加する傾向が認められた。前報⁽¹⁾にも引用したが、スクラッチ試験において被膜と基材との界面に働く応力は、(i)押し込みによる応力、(ii)膜の内部応力、(iii)摩擦による応力の3成分からなっている⁽⁶⁾。このうち(ii)の膜の内部応力については、3・5節で述べたように、焼戻し時間による違いは認められず、複合改質材相互の差はないと考えられる。一方(i)と(iii)については、焼戻しによってわずかではあっても基材表面の硬さが低下するため、応力は大きくなる傾向にあり、効果をもつとしても L_c の増加とは逆向きである。したがって、スクラッチ試験の結果における L_c の増加は、被膜と基材の付着強度自体の上昇によるものと考えられる。

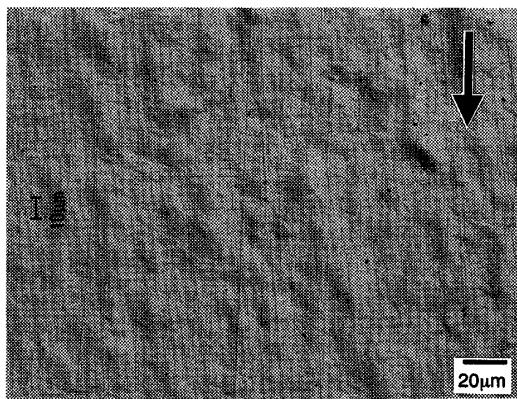
直接の証拠となるものはないが、その可能性を示唆する結果が報告されている。すなわち、イオンプレーティングによるTiN膜のスクラッチ試験において、基材との間にチタンの層があると L_c が増加する⁽⁷⁾というもので、3・6節のオージェ電子分光の結果で述べたように、あらかじめ焼戻しによって基材表面付近の窒素濃度が下がっているDM-2-2、DM-2-4では、成膜時に基材からの窒素の拡散が少ないため、界面にチタンの多い層が形成され、これが付着強度に寄与したのと考えられる。

4・2・5 膜寿命の延長について 4・2・1項に述べたように、膜寿命はTiN膜を主体とする摩耗状態から基材を主体とする摩耗状態への遷移によって生ずる。TiN膜を主体とする摩耗の比摩耗量が、基材の焼戻し時間によらず一定であったことから、しゅう動面の均一な摩耗によって膜が寿命に達するならば、その摩耗を示す1本の直線が、計算上TiN膜が消失する点に達したところで寿命に達し、焼戻し時間のいかに問わず膜寿命は同一になるはずである。

にもかかわらず、現実にはそれ以前に基材を主体とする摩耗に移行し、その移行が生ずるすべり距離は焼戻し時間によって異なっていた。これは、ある程度



(a) DM-2-0



(b) DM-2-4

Fig. 11 Comparison of cracks developed on the substrate surface after slid for 300 m The arrows indicate the sliding direction

TiN 膜が残存する状態において、部分的に基材に達する損傷を生じたためであり、それが発生するすべり距離が、焼戻し時間によって異なったことを示している。

TiN 膜の摩耗は、チップングとスクラッチとの二種類の損傷形態によって進行することがわかったが、上述の過程を支配するのは、相対的に大きな規模で生ずるスクラッチ損傷である。4・2・3 項, 4・2・4 項で述べた破壊靱性の向上と付着強度の向上の二つのメカニズムの相対的な重要性は明らかではないが、焼戻し時間の長い改質材においては、これらのいずれによってもスクラッチ損傷が抑制され、その結果膜寿命が延長されたものと解釈される。

5. 結 言

アルミニウム合金との無潤滑しゅう動試験において優れた耐摩耗性を示した、合金工具鋼の複合改質材を、高荷重・低速の条件で評価し、複合改質材の膜寿命に及ぼす基材の焼戻しの効果を調べた。得られた結果は次のとおりである。

(1) 複合改質材の摩耗量とすべり距離の関係は、主に TiN 被膜の摩耗を示す低比摩耗量の直線と、その後に見れる、主に基材の摩耗を示す高比摩耗量の直線によって表される。前者の比摩耗量は、焼戻し時間によらずほぼ同一で、プラズマ光輝窒化処理のみを施した改質材の約 1/5 であった。

(2) 摩耗量とすべり距離との関係において、摩耗が均一に生ずると仮定した場合に被膜が消失するすべり距離として定義した膜寿命は、基材の焼戻しによって 2 倍以上長くなった。

(3) 高荷重・低速における複合改質材の摩耗は、微小なチップングとそれより規模の大きいスクラッチによって生じている。焼戻しによる膜寿命の延長は、基材の破壊靱性の増加と、界面におけるチタン濃度の高い層の形成による被膜の付着強度の上昇によって、スクラッチ損傷が抑制されたためと考えられる。

終わりに、本実験の遂行にあたりご協力いただいた富山県立大学大学院学生の田中克典君に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 河村新吾・春山義夫・横井信安・木村好次・塩澤和章, 機論 65-640, C(1999), 4846-4853.
- (2) Hummer, E. and Perry, A. J., *Thin Solid Films*, 101(1983), 243-251.
- (3) Burnett, P. J. and Rickerby, D. S., *Thin Solid Films*, 148(1987), 41-65.
- (4) 日本機械学会基準, ドライコーティング膜の欠陥評価試験法, JSMES 010(1996), 6-10, 日本機械学会.
- (5) 松英達也・英崇夫・池内保一, 材料, 44(1995), 1121-1126.
- (6) Burnett, P. J. and Rickerby, D. S., *Thin Solid Films*, 157(1988), 233-254.
- (7) Bull, B. J. and Rickerby, D. S., *Thin Solid Films*, 181(1989), 545-553.