

# 被覆冷間プレス金型の摩擦特性と損傷形態

## Friction Properties and Damage Morphology of Coated Cold Press Dies

本多 史明\*  
Fumiaki Honda

井上 謙一\*\*  
Kenichi Inoue

ハイテン材のプレス加工に用いる被覆冷間金型において、損傷の原因となる摩耗やカジリの発生メカニズムの解明を目的とし、皮膜組成、表面粗さ、膜厚等の皮膜特性が損傷に及ぼす影響について調査を行った。その結果、PVD法で成膜したバナジウム(V)系皮膜は、各温度領域で安定した摺動特性を示し、表面に形成する酸化物がアブレシブ摩耗を抑制していることが判明した。さらに、表面粗さの平滑化や皮膜の厚膜化は、皮膜損傷を抑制することに有効であることが分かった。ハイテン材加工の実機評価において、皮膜特性を改善したAlCrVN組成のナノオーダーからなる交互積層皮膜は、金型寿命を大きく改善した。

To clarify the mechanism that leads to damage in the form of wear and galling in coated cold-working dies used for pressing high tensile strength steel (HTSS), an investigation was conducted into the influence of coating film properties such as composition, surface roughness, and thickness on the degree of damage. The results showed that vanadium (V)-based coatings deposited by physical vapor deposition (PVD) exhibited stable sliding characteristics at all test temperatures and the oxide that formed on the surface inhibited abrasive wear. It was also found that reducing the surface roughness and increasing the thickness of the coating were effective for inhibiting coating damage. In the evaluation using actual HTSS processing equipment, an AlCrVN coating whose properties were optimized by nanometer-scale control of its composition using alternating layer-by-layer growth was found to significantly improve the lifetime of the die.

● Key Word : 被覆冷間プレス金型, アブレシブ摩耗, V系皮膜  
● Production Code : Tribec 炬 (かがり)

● R&D Stage : Prototype

## 1. 緒言

従来から、板金プレス成形金型には、短寿命の原因となる摩耗やカジリなどの現象を抑制することを目的に、TRD (Thermo Reactive Deposition and Diffusion) 法やCVD (Chemical Vapor Deposition) 法などの表面処理が広く適用されてきた。しかし、ここ10年の間に、金型の高精度化がニーズとして強くなるなかで、処理温度が1,000℃以上と高いTRDやCVD法は、金型の変寸や変形が大きな問題となっている。そこで、焼戻し温度以下(～500℃)で処理が可能なPVD (Physical Vapor Deposition) 法の皮膜の適用が積極的に検討されている。

一方、自動車分野では、自動車の軽量化や衝突安全性の観点から、使用される鋼板のハイテン化が進み、それを成形する金型の使用環境が、年々過酷化する現状がある。このような背景から、PVD皮膜においても満足した金型寿命が得られ難くなっていることが問題視されている。

一般的に板金プレス成形型に使用されてきたPVD皮膜は、耐摩耗性や耐焼付き性を向上させるため、高硬度、低摩擦係数を特長としたものが採用されてきた。しかし、590 MPa以上のハイテン材成形ではそのような傾向は確認されておらず、必要な皮膜特性が明確になっていない。

本研究では、板金プレス成形における損傷メカニズムを解明するために、ボールオンディスク試験や往復動摩擦摩耗試験、スクラッチ試験を用いて、各皮膜の摺動面で起きている現象を解析し、ハイテン材の成形に最適な皮膜特性を有するPVD皮膜の検討を行った。

## 2. 板金プレス金型に適用されている皮膜

図1に冷間プレス金型に適用されている代表的な皮膜の特性を示す。主な皮膜組成は、炭化物、窒化物、炭窒化物から形成されており、皮膜硬さは1,500 HV～4,000 HVを示す。炭化物は低摩擦係数化、窒化物は耐酸化性を付与

\* 日立金属株式会社 高級金属カンパニー  
\*\* 日立ツール株式会社

\* High-Grade Metals Company, Hitachi Metals, Ltd.,  
\*\* Hitachi Tool Engineering, Ltd.

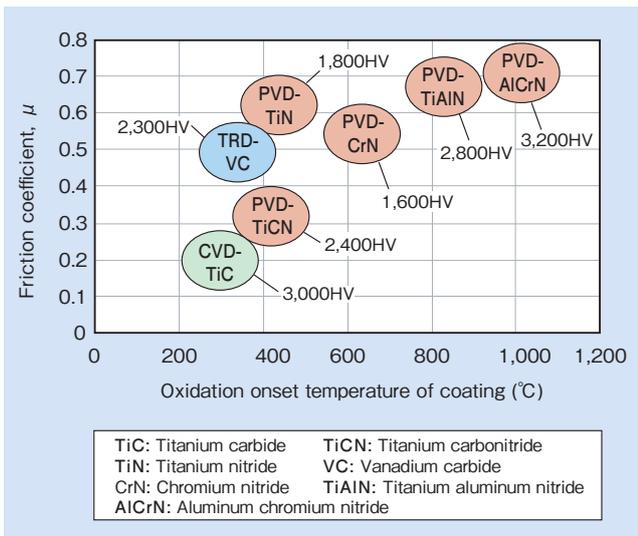


図1 各皮膜の摩擦係数と酸化開始温度の関係  
Fig.1 Relationship of friction coefficient and oxidation onset temperature for each coating

するために適している。

ハイテン材の成形においては、被加工材の強度が高くなるに伴い成形面にかかる負荷は増大し、同時に温度上昇が懸念される。それゆえ、当初、皮膜に要求される特性としては耐酸化性に優れるものが最適と考えられてきた。しかし、金型ユーザーにおいて、高ハイテン材の成形を行った実績では、皮膜硬さも耐熱性も低いTRD皮膜が優れた金型寿命を示すケースが多く確認された。

表1に各皮膜を施した590 MPaハイテン材冷間プレス金型の寿命ショット数を、図2に成形後のTRD皮膜の断面TEM (Transmission Electron Microscope: 透過型電子顕微鏡) 観察結果と、SAD (Select Area Diffraction) パターンを示す。PVD皮膜は40,000ショット以下、CVD皮膜は20,000ショットと、いずれも早期に金型表面にカジリが発生し短寿命となった。これに対して、TRD皮膜は300,000ショットまで損傷していない。成形後のTRD皮膜の断面TEM観察を行った結果、皮膜表層にFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>で指数付けできる微結晶のFe酸化物が存在し、それが200 nmの厚みで均等に形成していることを確認した。さらに、VC組成から成る皮膜と、付着物のFe酸化物の界面には、V酸化物が濃化していることが認められた。その他の皮膜には、成形面に酸化物は発生していないことから、TRD皮膜には、皮膜組成に含まれるVがFe酸化物を薄く均等に形成する何らかの効果があり、このFe酸化物がカジリ等の皮膜損傷を抑制していると考えられる。

そこで本研究では、最適皮膜の検討のひとつとしてV組成に注目をして、検討を行った。

表1 各皮膜を施した冷間プレス金型の寿命  
Table 1 Life of cold pressing dies in each coating

Coating process	TRD	PVD	PVD	PVD	CVD
Coating composition	VC	CrN	AlCrSiN	TiAlN	TiC
Life of dies	300,000	12,000	12,000	40,000	20,000

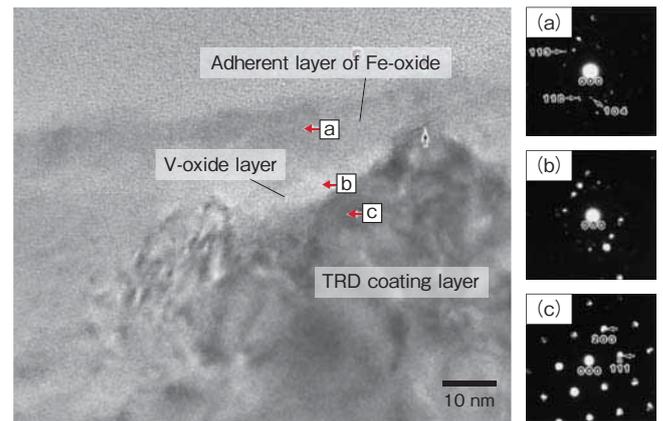


図2 ハイテン材成形後のTRD皮膜断面TEM観察結果  
(a) (b) (c) 各部位のSAD結果  
Fig.2 Cross section TEM analysis of TRD coating after pressing  
(a) (b) (c) SAD image of each spot

### 3. ボールオンディスク試験による検証

#### 3.1 試料作製方法

評価用試験片には、冷間金型用鋼SLD<sup>®</sup> (59HRC)を用い、PVD法-Arc Ion Plating装置にて被覆した各種皮膜を準備した。表2に試験に用いた各種皮膜の詳細を示す。その内、AlCrN+Al<sub>(1-X)</sub>V<sub>(X)</sub>N表記の皮膜においては、2種類の皮膜を交互積層させた複合皮膜である。これは、前項で注目したV組成の影響を評価することを目的とし、その積層組成は図3に示すように、AlCrNをベースにAl<sub>(1-X)</sub>V<sub>(X)</sub>N (X=0.3~1.0)を10 nm周期で積層させた。いずれも、鏡面試料をアルカリ脱脂洗浄を行った後、約3 μmの皮膜を成膜し、3次元ラップ機にて表面仕上げを実施した。さらに、TRD皮膜とCVD皮膜を比較に用いた。表中の皮膜硬さは、ピッカース硬さ試験機の荷重25 gで測定した値を、酸化開始温度は、大気炉を用い、各温度で1 h加熱した場合の皮膜が酸化した温度を示す。

表2 摺動試験用皮膜の詳細  
Table 2 Detail of coating samples for sliding test

Coating process	PVD	PVD	PVD	PVD	CVD	TRD	PVD
Coating composition	AlCrN	CrN	VN	TiSiN	TiC	VC	AlCrN + Al <sub>(1-X)</sub> V <sub>(X)</sub> N
Thickness (μm)	3	3	3	3	8	8	3
Hardness (HV <sub>0.025</sub> )	3,200	1,600	2,000	3,400	3,000	2,300	—
Oxidation temperature (°C)	1,000	600	400	1,000	300	300	700

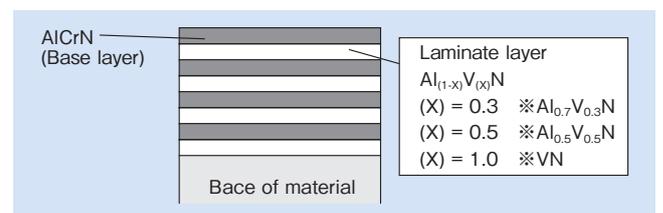


図3 AlCrN + Al<sub>(1-X)</sub>V<sub>(X)</sub>N皮膜構造の模式図  
Fig.3 Pattern diagram of laminate coating structure of AlCrN + Al<sub>(1-X)</sub>V<sub>(X)</sub>N

### 3.2 評価方法および測定方法

各種皮膜の摺動特性を評価するために、ボールオンディスク試験機を用いた。試験条件には、相手材を直径6 mmの軸受鋼 SUJ2 ボール、荷重 10 N、摺動半径 6 mm、摺動速度 10 m/min、無潤滑下とし、試験温度 25 ~ 400°C で、大気下および、真空下 ( $1 \times 10^2$  Pa) の条件を用いた。摺動部位の摩耗および付着量の測定には触針式粗さ計を用いた。

皮膜の機械的性質については、荷重 25 g によるピッカース硬さ試験機により皮膜硬さを測定し、残留圧縮応力の測定には、成膜後の歪量から下記の式 (1) にて応力を算出した。

$$\sigma = (E_s \times D^2 \times q) / (3 \times L^2 (1 \times V_s) \times d) \quad \dots (1)$$

$E_s$  : 基体のヤング率,  $V_s$  : 基体のポアソン比

$L$  : 最大歪部までの距離,  $q$  : 最大歪量

$D$  : 皮覆基体の厚み,  $d$  : 皮膜の厚み

各摺動面上に形成した凝着物の分析には、SEM (Scanning Electron Microscope : 走査型電子顕微鏡), AES (Auger Electron Spectroscopy : オージェ電子分光法) を用いた。

### 3.3 評価結果

図 4 に各皮膜組成における摺動試験の結果を示す。図中の縦軸は摺動面の凹凸を示しており、+側は相手材が凝着、-側は皮膜摩耗を意味する。AlCrN 単独の皮膜は、いずれの温度領域でも、局所的に相手材が凝着し、摺動部に凸形状が形成した。また、温度が上昇するに伴い、凝着物が多くなる傾向があった。CrN は 400°C で皮膜摩耗が発生したが、低い温度領域では AlCrN 同様に局所的な凝着形態を示した。VN は 100°C まで摺動面の凹凸差が少ないが、温度上昇に伴い皮膜摩耗に移行した。TiSiN と TiC は、各温度において皮膜摩耗が発生し、相手材の凝着が見られなかった。これらの結果から、Cr 系皮膜が凝着形態、V 系皮膜と Ti 系皮膜は摩耗形態を示す傾向にあると考える。

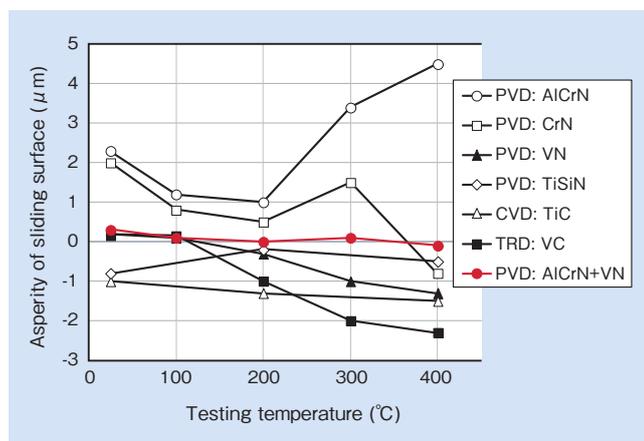


図 4 各皮膜におけるボールオンディスク試験結果  
Fig. 4 Result of ball-on-disk test in each coating

図 5 に大気下および真空環境下にて摺動試験を行った結果を示す。大気下の場合、AlCrN は局所的な凝着が発生したのに対し、TiC は皮膜摩耗が進行し、それぞれボール側の摩耗量が大きくなった。一方、真空下では、いずれ

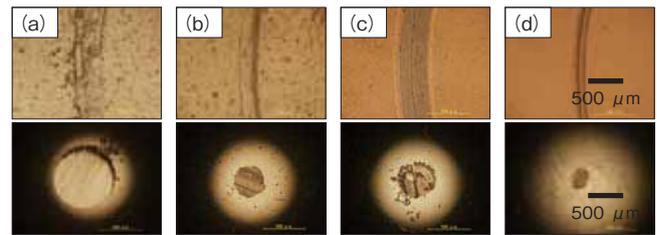


図 5 各環境下におけるボールオンディスク試験結果 (上段: 試験片側 (ディスク), 下段: 相手材側 (ボール))  
(a) AlCrN 大気下 (b) AlCrN 真空下 (c) TiC 大気下 (d) TiC 真空下  
Fig. 5 Result of ball-on-disk test on several environments (upper: test piece (disk), lower: counter parts (ball))  
(a) AlCrN atmos (b) AlCrN vacuum (c) TiC atmos (d) TiC vacuum

も凝着量や皮膜摩耗量、およびボールの摩耗量が減少した。このことから、大気下における摺動面の凝着や摩耗には、酸化現象が大きく影響していると推測される。よって、図 4 の結果で得られた、Cr 系、V 系、Ti 系の摺動特性の違いについても、各元素と酸素との反応性 (安定性) が大きく関係していることを示唆している。

凝着形態の AlCrN と摩耗形態の VN をナノ積層させた AlCrN+VN (積層組成:  $Al_0V_1N$ ) においては、図 4 のボールオンディスク試験から、各温度領域にて凹凸が少ない安定な摺動特性が得られた。図 6 に AlCrN+ $Al_{(1-x)}V_{(x)}N$  の摩擦係数を、表 3 にそれぞれの特性値を示す。AlCrN+ $Al_{(1-x)}V_{(x)}N$  の機械的性質は、積層組成の (X) が 0.3, 0.5, 1.0 と増加、すなわち皮膜中に V が多くなるに伴い、皮膜硬さや残留圧縮応力の特性値は失われるが、摩擦係数は低減する。

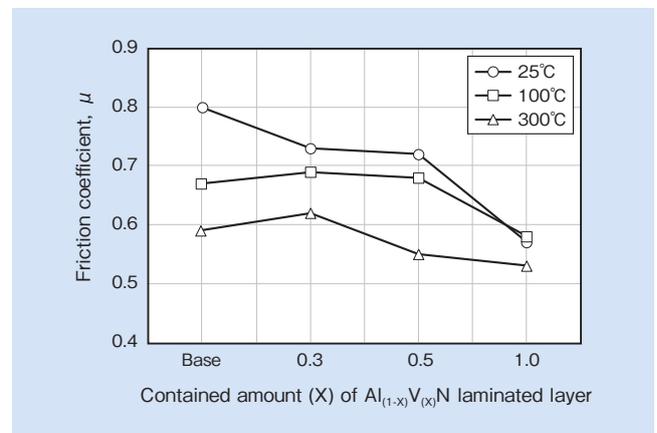


図 6 AlCrN +  $Al_{(1-x)}V_{(x)}N$  の摩擦係数  
Fig. 6 Friction coefficient of AlCrN +  $Al_{(1-x)}V_{(x)}N$

表 3 AlCrN +  $Al_{(1-x)}V_{(x)}N$  の特性値  
Table 3 Mechanical property of AlCrN +  $Al_{(1-x)}V_{(x)}N$

Laminate layer $Al_{(1-x)}V_{(x)}N$	Base	(X) = 0.3	(X) = 0.5	(X) = 1.0
Hardness (HV <sub>0.025</sub> )	3,100	2,850	2,700	2,600
Residual compressive stress (GPa)	3.3	3.2	3.0	2.7

次に、図 7 に AlCrN と AlCrN+VN (積層組成:  $Al_0V_1N$ ) の摺動面上の凝着物の SEM 像を、図 8 と図 9 に凝着物上から深さ方向に AES 分析した結果を示す。AES の結果から、AlCrN の局所的な凝着物には、凝着成分の Fe, O と、

皮膜成分の Al, Cr, N の境界が明確に表れており、皮膜表面の凹凸を起点に凝着が起きていると考える。凝着物が均一に形成した AlCrN+VN (積層組成: Al<sub>0</sub>V<sub>1</sub>N) は Fe, O の凝着物と皮膜成分の境界が不明瞭であり、化学的反応により凝着物が形成している可能性が高い。

板金プレス成形においては、ワークの局所的な凝着や、皮膜の摩耗はいずれも焼付きやカジリを発生させる原因につながるため、AlCrN+VN (積層組成: Al<sub>0</sub>V<sub>1</sub>N) のように各温度にて安定した摺動特性を有す皮膜が適していると考えられる。以後、AlCrN+VN (積層組成: Al<sub>0</sub>V<sub>1</sub>N) を AlCrVN と記載する。

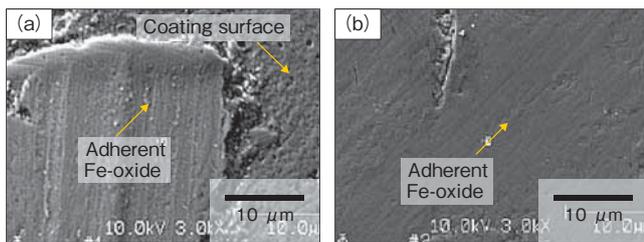


図7 摺動後における各皮膜表面のSEM観察結果  
(a) AlCrN (b) AlCrN + VN  
Fig. 7 SEM image of each surface after sliding test  
(a) AlCrN (b) AlCrN + VN

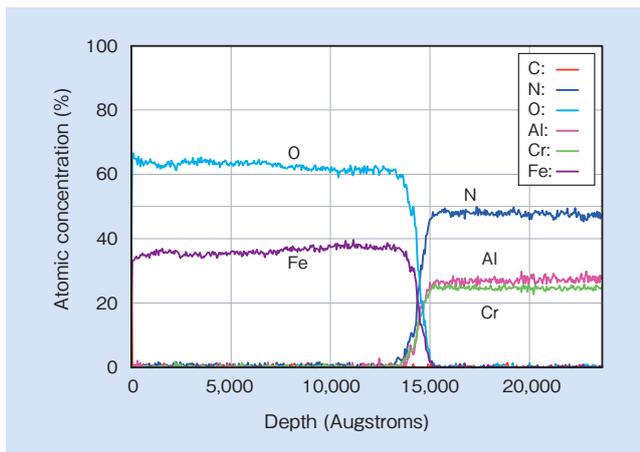


図8 AlCrN 表面に付着した Fe 酸化物の AES 分析結果  
Fig. 8 AES analyse of adherent Fe oxide on AlCrN coating surface

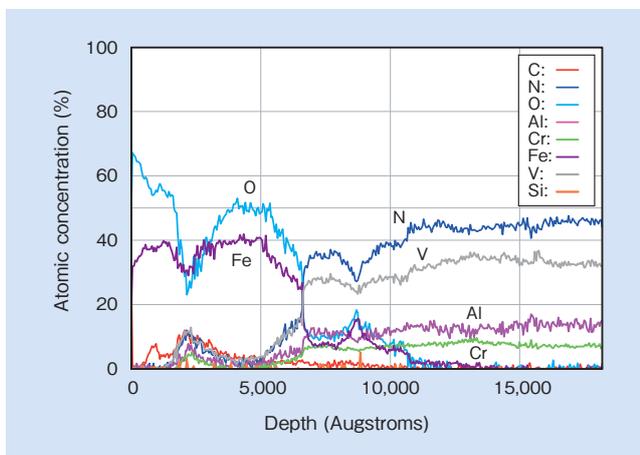


図9 AlCrN+VN 表面に付着した Fe 酸化物の AES 分析結果  
Fig. 9 AES analyse of adherent Fe oxide on AlCrN + VN coating surface

## 4. 往復動摩擦摩耗試験による検証

### 4.1 カジリ損傷の主な要因

ハイテン材板金プレス金型にて起こる損傷原因は、主にカジリ現象である。カジリ損傷とは、局所的に皮膜および基材が摩滅し、表面肌が荒れることを指す。このような金型側のカジリ損傷部は、それが被加工材表面に傷として転写させてしまい、製品不具合を発生させる。皮膜を一般的なセラミックス材料と同じと考えれば、その摩耗メカニズムには、凝着 (adhesion)、アブレシブ (abrasion)、表面疲労 (fatigue) が主として挙げられ、これらの現象が複雑に絡み合っており、一義的に定め難い。図10にセラミックス材料におけるアブレシブ (引っ掻き) 摩耗の概略図を示す<sup>1)</sup>。硬い粒子で脆性材料を引っ掻くと、塑性変形域の除去によりアブレシブ摩耗が生じやすく、接触部後端の引張応力が最大となる部位等では、クラックが発生すると報告されている。この概略図に類似した損傷パターンは、板金プレスの実型にて発生したカジリ損傷部付近にも確認することができる。例えば、図11に実型におけるカジリ損傷部のSEM観察結果を示すが、概略図と同様に、損傷部付近は皮膜のチッピングや、成形方向と垂直にクラックが発生している。このことから、板金プレス成形にて発生するカジリ損傷においては、アブレシブ摩耗が主要因であると考えられ、成形時に生成される被加工材の摩耗粉等が引っ掻きとして作用する可能性が高いと推測した。

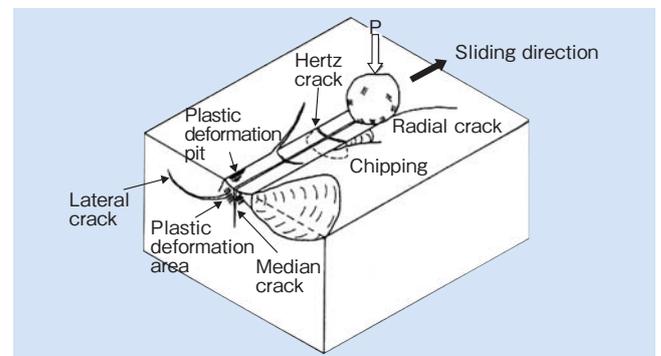


図10 セラミックスのアブレシブ摩耗概略図<sup>1)</sup>  
Fig. 10 Schematic view of abrasive wear of ceramics<sup>1)</sup>

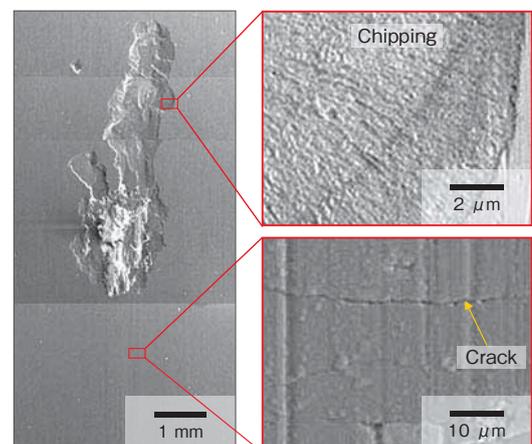


図11 実型におけるカジリ損傷部のSEM観察結果  
Fig. 11 SEM image of coating damaged area in pressing die

## 4.2 評価方法および測定方法

先述のアブレシブ摩耗によるカジリ現象を模擬することを目的に、各種皮膜を往復動摩擦摩耗試験機にて評価した。表4に評価用試験片の詳細を、図12に往復動摩擦摩耗試験機の概略図を示す。試験片には冷間金型用鋼SLD(59HRC)を基材としたW180×D20×H10 mm角棒を用い、鏡面研磨した表面に各種皮膜を成膜した。PVD皮膜は、膜厚および表面粗さの影響を調べるために、膜厚を4 μmと8 μm、表面粗さは、3次元ラップ装置を用いて表面を仕上げたRsk>0と、バフ研磨仕上げのRsk<0を準備した。ここで用いる表面粗さRsk値(ISO4287-1997)は、振幅曲線の中心線に対する山部と谷部の対称性を示すパラメータである。往復動摩擦摩耗試験の条件は、被覆した20×180 mmの面に、φ8×10 mmの相手材として熱間金型用鋼DAC<sup>®</sup>(45HRC)を線接触させ、ドライ環境、荷重200 kgf、摺動速度250 mm/secとした。摺動後の表面形状プロファイルの測定にはレーザー顕微鏡を、皮膜断面観察にはSEMを、摺動面の成分分析にはXPS分析を用いた。

表4 往復動摩擦摩耗試験用試験片の詳細

Table 4 Detail of coating samples of reciprocating slide type friction testing

Test condition	Number of sliding: 100			Number of sliding: 500		
	PVD	PVD	PVD	PVD	TRD	PVD
Coating process	PVD	PVD	PVD	PVD	TRD	PVD
Coating composition	CrN	AlCrN	TiC	AlCrN	VC	AlCrVN
Thickness (μm)	4, 8	4	4	4, 8	8	8
Hardness (HV <sub>0.025</sub> )	1,600	3,200	3,400	3,200	2,300	2,600
Roughness	Rsk>0	Rsk>0	Rsk>0	Rsk>0, Rsk<0	Rsk<0	Rsk<0

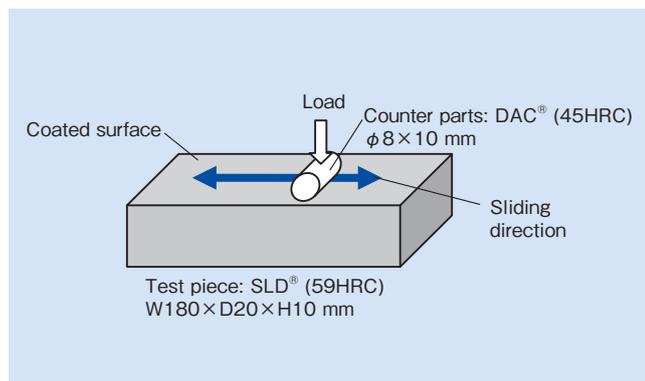


図12 往復動摩擦摩耗試験機

Fig. 12 Reciprocating slide type friction tester

## 4.3 評価結果

初めに3次元ラップ仕上げの表面粗さRsk>0の各種皮膜において、損傷状態/往復摺動100回時点の損傷状態を比較した。図13に往復摺動100回後の各種試験片外観写真を示す。CrN、AlCrN、TiCの各皮膜は、それぞれの機械的特性は異なるが、皮膜硬さや摩擦係数に関係なく、膜厚が厚いものにおいてカジリが発生しないことが分かった。

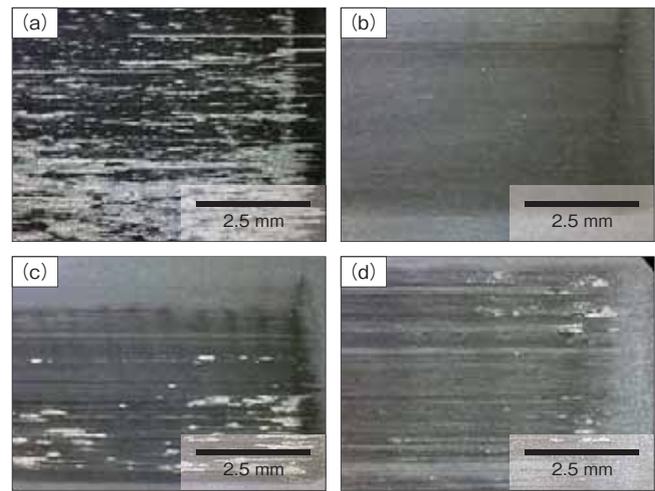


図13 往復動摩擦摩耗試験後の各種皮膜表面

(a) CrN 3 μm (b) CrN 8 μm (c) AlCrN 3 μm (d) TiC 3 μm  
Fig. 13 Surface of each coating after reciprocating slide type friction testing

(a) CrN 3 μm (b) CrN 8 μm (c) AlCrN 3 μm (d) TiC 3 μm

次に、往復摺動回数500回を上限とし、各種皮膜のカジリが発生するまでの往復摺動回数を比較した結果を図14に示す。表面粗さ違いで比較すると、膜厚4 μmのAlCrNは、Rsk>0が2往復でカジリが発生したのに対して、バフ研磨仕上げのRsk<0は110往復までカジリが発生せず、カジリに及ぼす表面粗さの影響が顕著に表れた。また、上記と同様に、膜厚は厚くなるに伴いカジリが抑制され、膜厚8 μm以上ではAlCrN、AlCrVN、TRD皮膜ともに摺動回数500回までカジリが見られなかった。このことから、カジリ損傷を抑制するには、表面平滑化および厚膜化が有効であると考えられる。

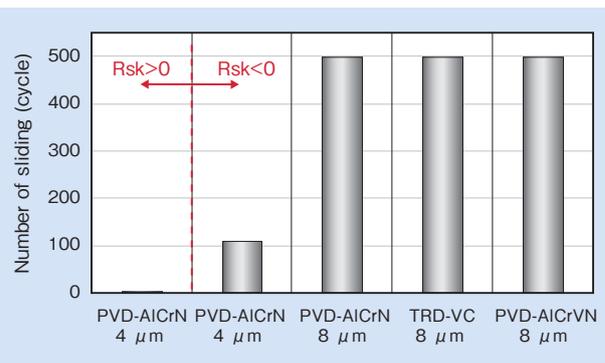


図14 各皮膜の往復動摩擦摩耗試験結果

Fig. 14 Result of reciprocating slide type friction testing in each coating

次に往復動摩擦摩耗試験でカジリ損傷が発生しなかった膜厚8 μmのAlCrNとAlCrVNの摺動面の状態を比較した。図15に各皮膜の摺動面の形状プロファイルを、図16に摺動面直下の皮膜断面SEM観察結果を、図17に摺動中に発生した摩耗粉のSEM観察結果を示す。それぞれの摺動後の被膜表面状態は異なっており、AlCrNには多数のスクラッチ痕が存在し、その皮膜断面には、表面から基材側に向かってクラックが進展している。さらに、摺動中に発生した摩耗粉の大きさは約100 μmであった。一方

の AlCrVN の摺動後の皮膜表面は平滑であり、皮膜内部に損傷等は発生していない。発生した摩擦粉は、AlCrN のそれよりも細かいことが分かった。また、AlCrVN の皮膜直上には、AlCrN にはほとんど見られない Fe 酸化物が均等に形成された。

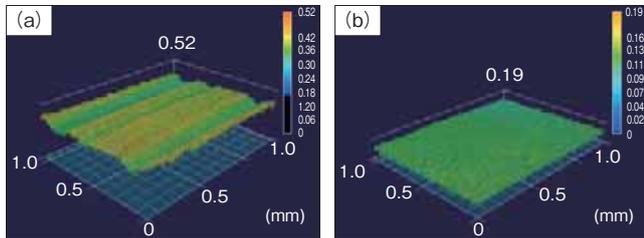


図 15 摺動後における各皮膜の表面形状 (a) AlCrN (b) AlCrVN  
Fig. 15 Surface profile of each coating after sliding test (a) AlCrN (b) AlCrVN

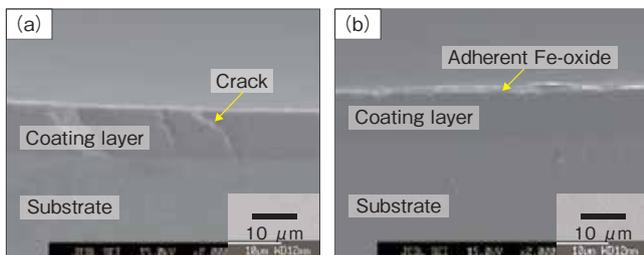


図 16 摺動面直下における各皮膜の断面 SEM 像 (a) AlCrN (b) AlCrVN  
Fig. 16 SEM image of cross section of each coating below sliding points (a) AlCrN (b) AlCrVN

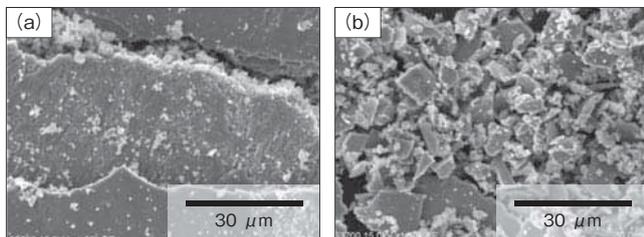


図 17 摺動試験にて発生した摩擦粉比較 (a) AlCrN (b) AlCrVN  
Fig. 17 Comparison of abrasion powder caused by sliding test (a) AlCrN (b) AlCrVN

#### 4.4 V 系皮膜の影響

往復動摩擦摩耗試験にて AlCrVN の摺動面に Fe 酸化物が形成したメカニズムを解明するため、図 18 に示す各種摺動面の付着物を、XPS 分析により 10 nm ごとに深さ方向の結合状態を調査した。図 19 に、AlCrN 皮膜上の局所的に残った凝着物と、AlCrVN 皮膜上に形成した凝着物の O1s 軌道に起因する結合状態を示す。その結果、AlCrVN

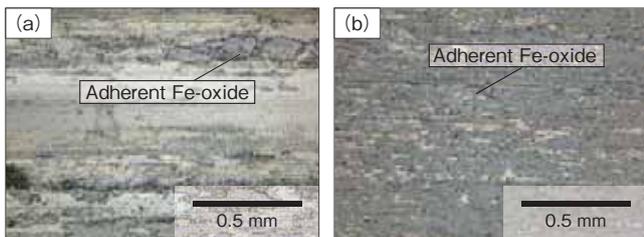


図 18 摺動試験後の各皮膜の表面外観写真 (a) AlCrN (b) AlCrVN  
Fig. 18 Appearance of each coating surface after sliding test (a) AlCrN (b) AlCrVN

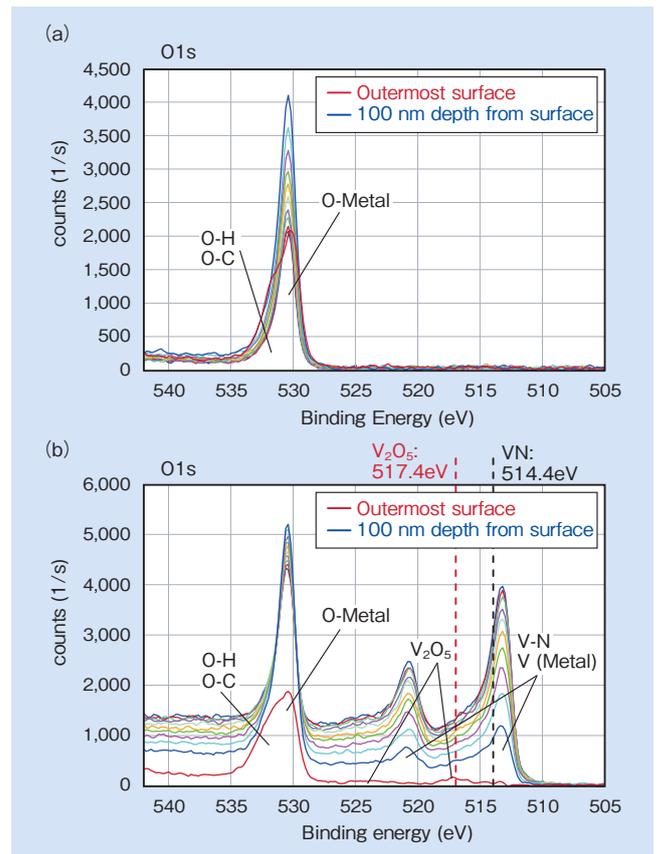


図 19 各皮膜上に付着した Fe 酸化物の XPS 分析結果 (a) AlCrN (b) AlCrVN  
Fig. 19 Result of XPS analysis of adherent Fe-oxide on each coating surface (a) AlCrN (b) AlCrVN

の凝着物においては、主成分の  $Fe_2O_3$  の他に、V 酸化物の  $V_2O_5$  (517.4 eV) 結合とその他の V-O 系結合が存在していることが判明した。この現象は、摺動中に AlCrVN の皮膜中に含まれる V が酸化し、それが凝着物の Fe 酸化物物中に取り込まれていることを示唆している。さらに、図 20 に示す計算状態図から、 $V_2O_5$  は  $Fe_2O_3$  の共晶点を  $645^\circ C$  にまで下げることが分かる。また、 $V_2O_5$  はさまざまな酸化物に対しても共晶点を下げる働きがあることも報告されている<sup>2)</sup>。

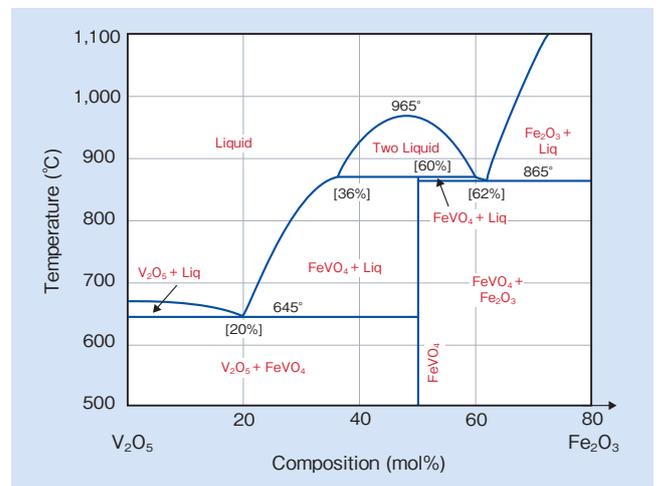


図 20  $V_2O_5$  と  $Fe_2O_3$  の二元系状態図  
Fig. 20 Binary phase diagram of  $V_2O_5$  and  $Fe_2O_3$

以上のことから、Vを含有する皮膜は、摺動発熱等により皮膜表面が適度に酸化し、それが、被加工材表面に形成されるFe酸化物に固溶することで、仕事面で液相のような状態が生まれ、摩耗粉発生の抑制につながったと推察する。

## 5. スクラッチ試験による検証

皮膜損傷の発生要因としては、4項の摩耗粉等の噛込みによる皮膜表面側を起点としたクラックの他に、摺動下にて発生する高いヘルツ応力も原因のひとつと考える。例えば、図21はハイテン材板金プレス型として使用されたAlCrN皮覆金型の断面SEM観察結果であるが、皮膜表面側ではなく、皮膜内部を起点としたクラックの存在も確認した。そこで、本クラック形態を模擬するために、スクラッチ試験を用いて評価を実施した。

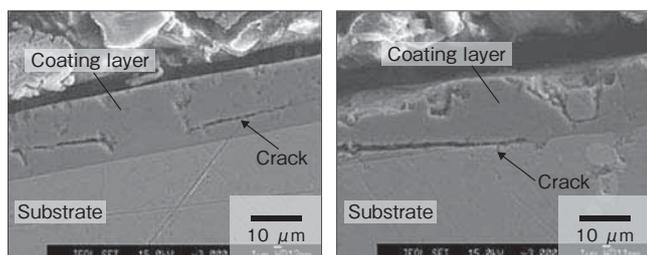


図21 実型成形後のPVD皮膜の断面SEM像  
Fig. 21 SEM image of cross section of PVD coatings after pressing

### 5.1 評価方法および測定方法

スクラッチ用試験片には、被覆基材に高速度工具鋼YXM<sup>®</sup>1 (63HRC)を用い、PVD法-Arc Ion Plating装置にてArCrN膜厚4 μm、8 μm、15 μm、23 μmを成膜した試料と、軟窒化処理を施した上にAlCrNを15 μm被覆した試料を準備した。いずれも、鏡面の基材に成膜後、バフ研磨により表面粗さRsk<0に仕上げた。スクラッチ試験条件は、CSM Instruments社製のScrath Testerを用い、スクラッチ速度10 mm/sec、荷重を40 N、60 N、80 N、100 N、120 N一定とし、それぞれ評価を実施した。試験後の皮膜断面調査にはSEM観察を行った。

### 5.2 評価結果

図22にスクラッチ試験後の皮膜断面SEM観察結果を示す。スクラッチの圧子が接触し、母材が塑性変形した部位の付近では、皮膜が表面側に向かって斜め方向にクラックが進展していた。このクラックの発生形態は、図21の金型にて発生した内部クラックと類似している。このことから、金型に見られた内部クラックは、成形中に局所的に基材が変形するほどの応力が働いたと考える。また、スクラッチ試験にて、圧子が押し込まれた直下は圧縮応力、押し込まれた周辺には引張応力が働くことが、有限要素法解析の結果から報告されており<sup>3)</sup>、このように働く応力場により皮膜内部からの斜めクラックが発生していると推測する。

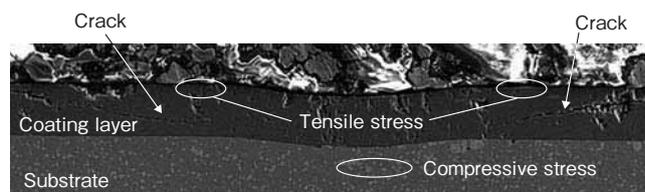


図22 スクラッチ痕直下のPVD被膜断面SEM像  
Fig. 22 SEM image of cross section of PVD coatings below scratch track

次に、各皮膜における基材の塑性変形量とスクラッチ荷重の関係を図23に示す。なお、各皮膜ともに、皮膜に剥離や破壊が発生した臨界荷重時点でスクラッチ試験を終了とした。評価の結果、同じスクラッチ荷重値で比較すると、皮膜の膜厚が4 μm、8 μm、15 μm、23 μmと厚くなるに伴い、基材の塑性変形量が小さくなる傾向を示し、また、窒化処理を併用することによっても、基材の塑性変形量は低減した。さらに、基材の塑性変形量が小さいものは、皮膜破壊が発生する臨界荷重値が高くなることも確認した。

仮に、外部から加わる力が母材の弾性変形内の力であっても、脆性材料の皮膜は弾性限界値が低いため、優先的にクラックが発生する可能性は十分に考えられる。カジリ原因となる皮膜内部のクラックの発生を抑制するには、皮膜の厚膜化、および窒化による基材表面の硬化は、いずれも効果的な手段であることがわかった。

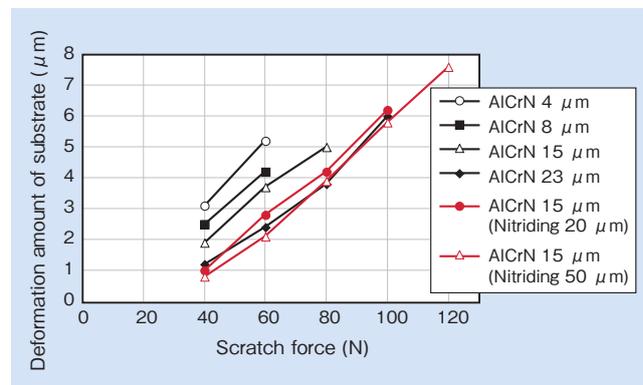


図23 基材塑性変形量とスクラッチ荷重の関係  
Fig. 23 Relationship of deformation amount of substrate and scratch force

## 6. 実型による検証

前項までのボールオンディスク試験、往復動摩擦摩耗試験、スクラッチ試験の結果から、板金プレス金型用PVD皮膜の仕様としては、摺動特性に優れたV系皮膜、表面の平滑化、厚膜化が適していると考えられる。

そこで、次に、皮膜組成AlCrVN、膜厚15 μm、表面粗さRsk<0の皮膜を準備し、ハイテン材における曲げ絞り成形の実型評価を実施した。被加工材にSPH590 (590 MPa級ハイテン材)、板厚3.2 mmを用い、しごき率10%、加工油無しとし、本報で検討したPVD法のAlCrVN皮膜と、一般PVD皮膜(CrN、VC等)、TRD法のVC皮膜、CVD法TiC皮膜にて寿命評価を行った。いずれも皮覆基材に冷間金型用鋼SLD-MAGIC<sup>®</sup> (60HRC)を用いた。

表5に示す実機評価の結果、一般PVD皮膜が250ショット以下、TRD法のVC皮膜が150ショット、CVD法のTiC皮膜が900ショットでカジリが発生したのに対して、PVD法のAlCrVN皮膜は5,000ショット成形時点でカジリ等の皮膜損傷が皆無であった。

表5 各皮膜を施した冷間プレス金型の寿命  
Table 5 Life of cold pressing dies in each coating

Coating process	PVD	TRD	CVD	PVD
Film composition	CrN, VC etc.	VC	TiC	AlCrVN
Life of dies	< 250	100~500	900	5,000

図24に成形後のAlCrVN皮膜断面TEM観察結果を示す。AlCrVNの皮膜表面には、2項で示した、ハイテン成形型にて長寿命を示したTRD皮膜の表面状態や、往復動摩擦摩耗試験にて確認した表面状態と同様に、Vを固溶したFe酸化物が微結晶体として約60nmの厚みで形成していることが判明した。よって、この酸化物の付着形態が、カジリ等の皮膜損傷の抑制に有効に働いたと考える。なお、この実型評価にてV組成からなるTRD皮膜の型寿命が短い理由としては、成形面の温度上昇の影響で、耐酸化性に弱いTRD皮膜は短寿命に至った可能性が高い。

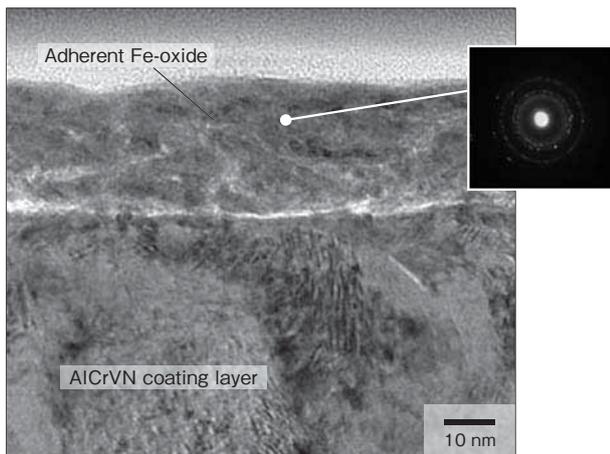


図24 成形後のAlCrVN皮膜断面TEM像  
Fig. 24 TEM image of cross section of AlCrVN after pressing

## 7. 結 言

本報にて、表面処理を施した板金プレス金型に起こる摩耗やカジリの損傷においては、各温度領域における相手材凝着や皮膜摩耗、摩耗粉等の噛込みによる皮膜破壊、母材の変形に起因する皮膜破壊などが主な原因になることが明らかになった。そして、これらの現象の改善を検討した結果、PVD法で成膜したバナジウム(V)系皮膜は、各温度領域で安定した摺動特性を示し、表面に形成する酸化物がアブレイブ摩耗を抑制することが判明した。さらに、表面粗さの平滑化や、皮膜の厚膜化は、皮膜損傷を抑制することに有効であることが分かった。そして、特性を改善したAlCrNとVNのナノオーダー周期からなる積層皮膜AlCrVNは、ハイテン材加工の実機評価において、金型寿命を大きく改善することを可能とした。

## 引用文献

- 1) 普及版 トライボロジーの解析と対策, テクノシステム (2003), p.224-229.
- 2) 岡田康孝: 新しい切削技術 (2004年11月), p.66.
- 3) 早川邦夫: スクラッチ試験における被膜-基材界面応力状態に対する有限要素解析, 塑性と加工, 52-610 (2011), p.1181-1186.



本多 史明  
Fumiaki Honda  
日立金属株式会社  
高級金属カンパニー



井上 謙一  
Kenichi Inoue  
日立ツール株式会社  
技術士(金属部門)