



S. Nishino

コーティング処理されたプレス金型の 損傷評価

西野 創一郎*

1. まえがき

軽量化と衝突安全性の両立を目的として、自動車車体部品への高張力鋼板の適用が進んでいる。このため、成形するプレス金型に成形時に大きな負荷がかかり、金型損傷が懸念されている。プレス金型には成形過程において、局部的に大きな面圧が発生する肉余り部やしごき部が存在する。この部位の金型表面は高面圧を繰り返し受けるため、焼付き・かじりの不具合が発生し大きな問題となっている。この問題を解決するために金型表面にコーティング皮膜を付着させて金型と被加工材の凝着を防止する処理が施されている。このため、金型耐久性を向上させる表面処理技術の重要性は高まっており、数多くの研究成果が報告されている⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。

金型へのコーティング処理として、低温処理の物理蒸着法 (Physical Vapor Deposition, PVD 処理と称す)、高温処理の化学蒸着法 (Chemical Vapor Deposition, CVD 処理法と称す)、および溶融塩浴処理法 (Thermo-Reactive Deposition and Diffusion, TRD 処理と称す) がある。PVD 処理は成膜温度が低く製品のゆがみが小さいが、母材と皮膜との密着性が低い。

TRD 処理および CVD 処理は成膜温度が高く母材と皮膜との密着性が高いが、製品のゆがみは大きい。金型適用には皮膜の密着性を優先し、高温処理での皮膜が多く使用されている。コーティング皮膜の耐久性評価法は多数存在しており、ボールオンディスク試験による摩耗・摩擦係数の測定、スクラッチ試験による皮膜の密着性評価、その他に、帯板しごき試験や深絞り加工試験、ボール通し試験などがある。一方で、実験方法の種類によって結果が異なる場合や実際のプレス加工を体現していない場合もあり⁽⁸⁾、ユーザーサイドからみると、皮膜の耐久性や密着性を加工工程とリンクさせて系統的に整理されたデータが必要とされている。

かかる観点から、著者らは一連の研究において、プレス成形における金型損傷を再現する試験方法を考案して実験を行い、皮膜の損傷メカニズムについて明らかにしてきた⁽⁹⁾⁻⁽¹⁵⁾。本研究では、汎用コーティング技術である TRD および PVD 処理を施された金型を用いて実際のプレス成形試験を行い、高面圧下での摺動損傷について連続観察を実施した。その際に、損傷を受けた金型の断面を詳細に観

察することにより、皮膜だけではなく界面および基材まで含めた総合的な損傷評価を行った。また、コーティング金型の熱損傷実験を実施して、摺動によって発生した熱による基材の損傷を再現したのでその結果も併せて報告する。

2. プレス成形過程におけるコーティング金型の摺動損傷

2.1 試験片および実験方法

プレス成形による摺動試験には合金工具鋼鋼材・冷間ダイス鋼の SKD11 を用い、図 1 に示す試験片形状に加工して、焼入れ・焼戻し処理と TRD コーティング処理 (膜種 VC) を同時に行った。また、同一条件で焼入れ・焼き戻し処理を行った SKD11 材に PVD コーティング処理 (膜種: TiCN) を行った試験片も併せて準備した。TRD 処理 VC 皮膜の膜厚は 8 μ m、硬度は 2163Hv、PVD 処理 TiCN 皮膜の膜厚は 2 μ m、硬度は 2726Hv である。被加工材には自動車用高張力鋼板 JSC590R (板厚 1.6mm、寸法 50mm \times 50mm) を使用した。

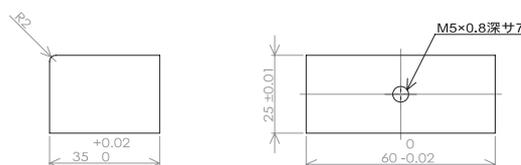


図 1 試験片寸法

図 2 に示すように、150t 電動サーボプレス機械に、被加工材を成形するパンチと金型試験片がはめ込まれたダイを設置してプレス試験を行った。コーティング処理が施された金型試験片の部分では成形品が縮みフランジとなっており板厚が増えて高面圧で摺動される。加えて、試験片とパンチの間のクリアランスを被加工材の板厚よりも小さく設定して (-0.4mm)、プレス成形における高面圧部すなわち加工が厳しい部位を模擬的に再現した。図 3 における成形品において○印で示した部分が高面圧で摺動された箇所である。

* 茨城大学大学院 理工学研究科 量子線科学専攻 准教授



図2 試験片のセッティング



図3 被加工材 (加工後)

上記のプレス機械および金型, 試験片を用いてプレス成形試験を実施した. その際に, 所定の成形回数 (10 回, 90 回, 140 回) で試験を中断して, 試験片を金型から取り出して光学顕微鏡により同一カ所の表面観察を実施した. 試験片表面および成形品の連続観察から目視にて明らかな表面損傷が観察された時点で成形を終了して, 金型寿命 (最終成形回数) とした. その後, 試験片を切断して走査型電子顕微鏡 (SEM) およびエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDX) により損傷個所の断面観察を実施した. また, 微小硬さ計による基材硬度の測定および超微小硬さ計による皮膜の力学特性の測定も併せて実施した.

2.2 金型寿命と皮膜特性の関係

プレス成形によるコーティング金型試験片の摺動試験を行った結果, TRD 処理 (VC 皮膜) を施した試験片では 250 回, PVD 処理 (TiCN 皮膜) を施した試験片では 200 回で明らかな損傷が認められたために金型寿命とした. 皮膜硬度は VC 皮膜で 2163Hv, TiCN 皮膜で 2726Hv であり, より硬質な TiCN 皮膜の方が短い金型寿命を示した. このことについて詳細に検討した.

金型寿命での表面観察結果を図 4 に示す. 両者ともに摺動痕が認められたが, 損傷が大きい箇所は試験片上部の R 部から平坦部になった部分であった. この損傷が大きい部分の拡大写真を図 5 に示す. VC 皮膜および TiCN 皮膜ともに, 摺動方向に垂直方向の割れとカジリが認められる. 特に損傷の大きい個所では基材を含めた陥没が観察されており, 高面圧の摺動負荷によって皮膜だけではなく基材まで損傷が及んでいる.

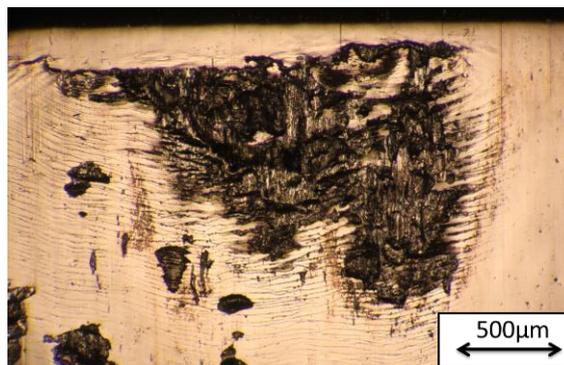


(a) TRD 処理 VC コーティング



(b) PVD 処理 TiCN コーティング

図4 コーティング試験片表面の様相



(a) TRD 処理 VC コーティング



(b) PVD 処理 TiCN コーティング

図5 摺動損傷

皮膜の割れを SEM によって詳細に観察した結果 (図 6), 割れた箇所には被加工材である鉄が凝着している. また, 割れの間隔は VC 皮膜の方が TiCN 皮膜よりも大きい. 割れの間隔の差から VC 皮膜の方が摺動負荷に対する抵抗が大きいと考えられるため, 超微小硬さ計によって皮膜の特性を調査した.

図 7 は, 超微小硬さ計を用いて成形試験前の試験片において表面から 100mN の荷重で押し込み試験を行った結果である. 押し込み量は $0.5\mu\text{m}$ であり膜厚に対して十分小さいことから, 基材の影響を受けずに皮膜そのものの材料特性を測定できている. この結果から, どちらの皮膜でも塑性変形が生じているが, 塑性変形による仕事量は VC 皮膜の方が TiCN 皮膜よりも大きいことがわかる. この塑性仕事量は皮膜の靱性を表しており, 靱性の差によって皮膜の割れの間隔に差が生じたと考えられる. 以上の結果から, コーティング金型の寿命を伸ばすためには, より硬質な皮膜ではなく, 摺動負荷に追従する靱性の高い皮膜を選定することが重要であると言える.

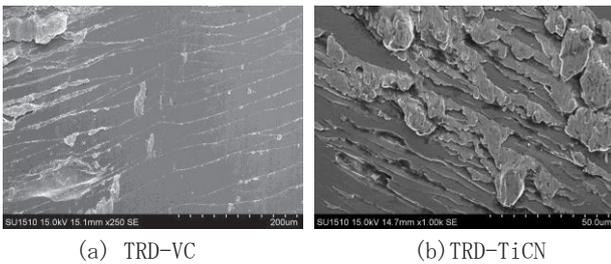


図 6 コーティング皮膜の割れ

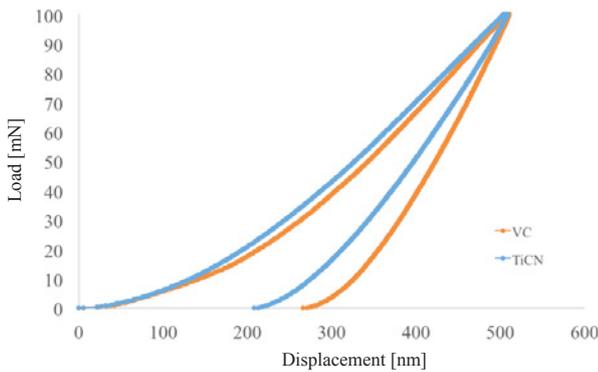


図 7 コーティング皮膜の荷重-変位線図

図 8 は, VC 皮膜の試験片表面の連続観察結果である. 成形回数 90 回で高面圧部に損傷が認められた. 同図より, 試験片上端部から摺動方向に $300\mu\text{m}$ 下がった部分にしわが生じ, しわの下部で摺動方向に対して垂直方向にコーティング皮膜の割れが観察された. 摺動回数を重ねるごとに試験片表面の変形は大きくなり, その部分へ鉄の凝着が堆積している. 表面の凹凸を光学顕微鏡におけるピント調整で測定した結果, 約 $20\mu\text{m}$ であった. 皮膜の膜厚は $8\mu\text{m}$ であり, 損傷は基材まで及んでいる. 皮膜のみならず基材を含めた表面変形と被加工材である鉄の凝着によって損傷

が進み, 面圧および摩擦係数の局所的な増加から, 皮膜が摺動方向に対して座屈によって破壊されると考えられる.

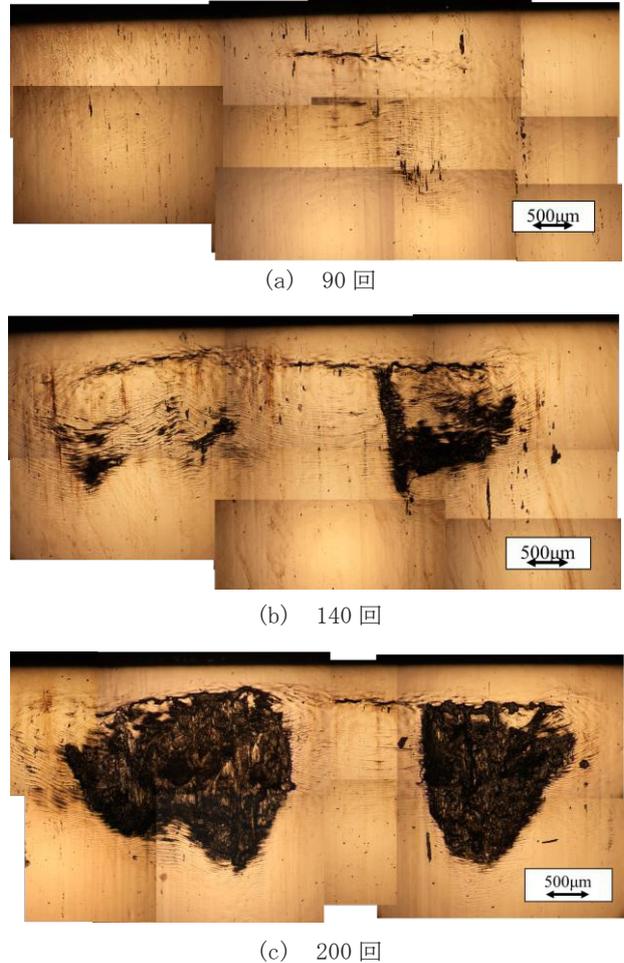


図 8 試験片表面の連続観察 (TRD-VC)

図 9 は, 金型寿命での VC 皮膜および TiCN 皮膜の損傷部断面を SEM で観察した結果である. どちらの皮膜も摺動方向に対して階段状に割れている. また, 皮膜と基材の界面での剥離現象は認められなかった. このことから皮膜の基材への密着強度はどちらのコーティング処理においても十分に確保されていることがわかる. コーティング処理方法や膜種が異なっても皮膜の摺動損傷形態に相違は無いことが確認された.

図 10 は, VC 皮膜の損傷部の SEM 観察および EDX 分析結果である. 階段状に割れた VC 皮膜の上に堆積した物質が認められる. EDX 分析の結果, VC 皮膜の下の基材 (SKD11) には構成元素である Cr と Fe が検出されたが皮膜の上に堆積した物質には Fe のみが検出された. この結果から皮膜の上に被加工材である鉄が凝着していることがわかった.

図 11 は, 損傷が最も大きかった箇所の断面写真である. どちらのコーティング試験片においても皮膜が消失している. 表面写真においても同様の結果が観察されたが, この損傷の深さは基材まで及んでいる. すなわち, プレス成形による摺動損傷は皮膜の割れだけではなく, 基材にまで影響を及ぼしている. 図 8 における表面観察結果からも,

成形回数が少ない段階で金型表面にしわ状の変形が進んでいることが認められた。

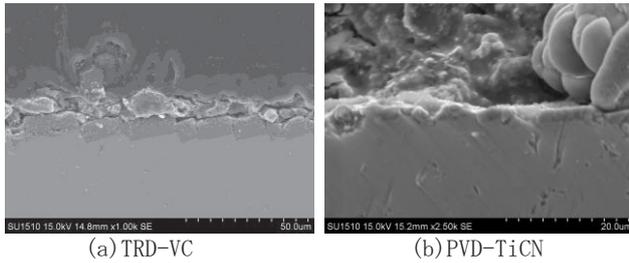


図9 損傷部の試験片断面観察

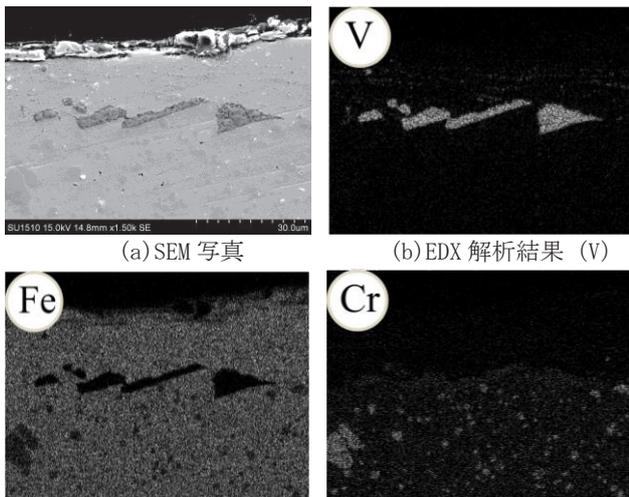


図10 VC皮膜損傷部のSEM観察およびEDX分析結果

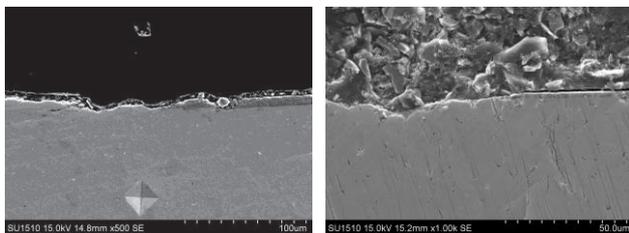


図11 皮膜および基材の損傷

図12は、金型寿命における損傷断面部の基材硬度を測定した結果である。試験片表面から0.05mmおよび0.55mmの深さで摺動方向と平行に0.5mm間隔で硬度を測定した。同図から、損傷が激しかった試験片R部近傍において基材の軟化が認められる。試験片表面から0.05mmで軟化が認められるが、表面から0.55mmでは認められないことから、この軟化現象は摺動損傷が激しい部分の表面層で起きていることがわかる。

以上の結果から、コーティング金型のプレス成形における摺動損傷は、(1)基材の軟化、(2)皮膜の階段状割れ、(3)被加工材の凝着、(4)皮膜を含めた基材の剥離というプロセスで進行していくと考えられる。コーティング金型の基材が摺動負荷によって軟化する要因として、摺動時の摩擦熱が考えられる。そこで、SKD11材に熱処理を施

す熱損傷試験を行うこととした。

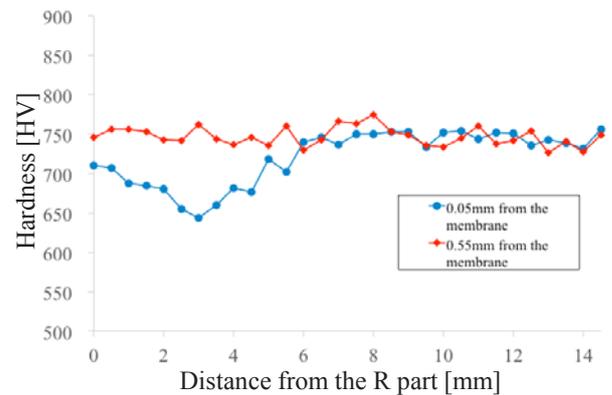
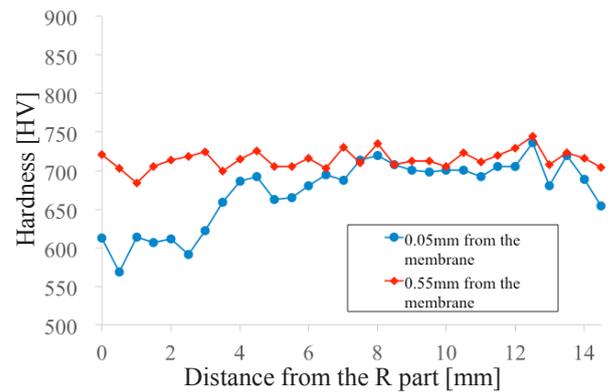


図12 基材の軟化現象

3. コーティング金型の熱損傷試験

3.1 試験片および実験方法

摺動試験で使用した合金工具鋼鋼材・冷間ダイス鋼SKD11にTRD処理によりVC皮膜をコーティングして熱処理試験片とした。熱処理は、小型プログラム電気炉を用いて昇温時間2時間、保持時間1時間後炉冷とした。処理温度は200℃、300℃、400℃、500℃、600℃の5種類を選定した。なお、試験雰囲気は大気中である。

3.2 実験結果および考察

各処理温度における硬度測定結果を図13に示す。測定箇所は皮膜から深さ方向に0.05mm、0.55mm、1.05mmの3カ所である。熱処理温度200℃から500℃までは硬度に変化は無いが、600℃では硬度が大きく低下しており基材の軟化が認められた。この結果から、本研究における摺動試験では摩擦熱によって試験片表面の温度が600℃以上まで上昇していると考えられる。一方で、鉄鋼は熱伝導率が高いために摺動による発熱は表面近傍に限定されると予測される。

図14は熱処理後の試験片の断面写真である。処理温度500℃では皮膜の形態に変化は無いが、600℃では酸化によって皮膜表面が欠落した様子が認められる。摺動負荷による摩擦熱によって基材が軟化するだけでなく、皮膜も熱による酸化で損傷を受ける可能性があることが示唆され

た。

以上の結果から、コーティング金型の耐久寿命を伸ばすためには耐熱性の高い皮膜と熱による軟化が少ない金型基材の選定が有効であると考えられる。

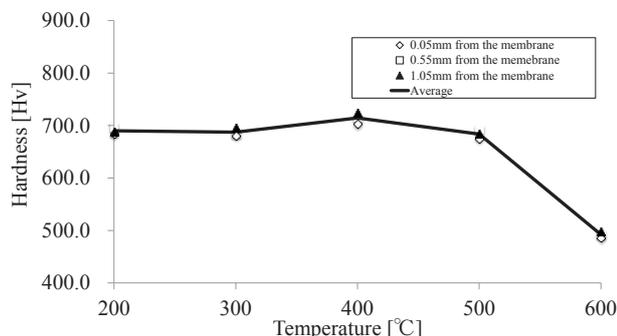


図 1.3 熱処理後の硬度 (SKD11)

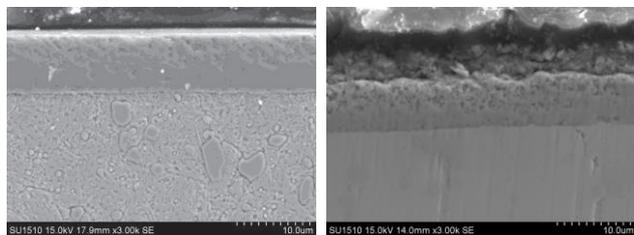


図 1.4 熱処理試験片の断面観察

4. 結論

本研究では、コーティング金型におけるプレス成形時の摺動損傷を再現する試験方法を考案して実験を行い、摺動負荷による皮膜および基材の損傷メカニズムを明らかにした。また、熱処理試験を実施して、摺動によって発生した摩擦熱による基材と皮膜の損傷を再現した。得られた結果を以下に示す。

(1) 摺動損傷は、基材の軟化、皮膜の階段状割れ、被加工材の凝着、そして皮膜を含めた基材の剥離というプロセスで進行する。

(2) 摺動負荷による摩擦熱でコーティング金型の表面は600°C以上に加熱されて基材 (SKD11) の軟化が生じる。また、この温度では皮膜も酸化による損傷を受ける。

(3) コーティング金型の寿命を伸ばすためには、摺動負

荷に追従する靱性の高い皮膜を選定すること、そして、耐熱性の高い基材と皮膜を使用することが重要である。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- (1) 仁平宣弘, 三尾淳: はじめての表面処理技術, (2012), 技術評論社.
- (2) 日原政彦・型技術協会型寿命向上研究委員会編: 金型高品質化のための表面改質, (2009), 日刊工業新聞社.
- (3) 市村博司, 池永勝: プラズマプロセスによる薄膜の基礎と応用, (2005), 日刊工業新聞社.
- (4) 池永勝, 鈴木秀人: ドライプロセスによる超硬質皮膜の原理と応用, (2000), 日刊工業新聞社.
- (5) 河田一喜: 本当によくわかる窒化・浸炭・プラズマCVD, (2012), 日刊工業新聞社
- (6) 日本塑性加工学会編: 第 312 回塑性加工シンポジウム, (2014).
- (7) 日本塑性加工学会編: 第 138 回塑性加工学講座テキスト, (2004).
- (8) 井上薫ほか 4 名: 塑性と加工, 52-609(2011), 1073-1077.
- (9) 川村善徳ほか 3 名: 自動車技術会 2005 年春季大会学術講演前刷集, 18-05(2005), 17-20.
- (10) 西野創一郎ほか 6 名: 自動車技術会 2006 年春季大会学術講演前刷集, 20-06(2006), 15-18.
- (11) 井上薫ほか 8 名: 自動車技術会 2009 年春季大会学術講演前刷集, 17-09(2009), 7-10.
- (12) 井上薫ほか 6 名: 自動車技術会 2009 年秋季大会学術講演前刷集, 103-09(2009), 13-16.
- (13) 鈴木優大ほか 5 名: 自動車技術会 2010 年春季大会学術講演前刷集, 17-10(2010), 5-8.
- (14) 小林正憲ほか 6 名: 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, 33-12(2012), 9-12.
- (15) 西野創一郎, 大屋邦雄: 塑性と加工, 56-650(2015)