論文

アルミニウムめっき高張力鋼板のホットスタンピングにおける摩擦係数に及ぼす工具表面被膜の影響

宇田 紘助* 小豆島 明**

Effect of Die Surface Coating on Coefficient of Friction in Hot Stamping of Aluminum-coated High-Strength Steel

Kosuke UDA* and Akira AZUSHIMA**

(Received on January 31, 2013)

Recently, high-strength steels with over 1500 MPa in tensile strength have been manufactured by hot stamping. To decrease their coefficient of friction, the effects of die surface coating on such a parameter were investigated. The Five kinds of die coated with TiN, TiCN, CrN, TiAlN, and DLC-Si were used. The experimental tests were carried out under a dry condition using a simulation testing machine developed by the authors, and the coefficient of friction for a drawing stroke was measured. The coefficient of friction of the noncoated die increased abruptly with a stroke of 5 mm. On the other hand, the coefficients of friction of the hard-coated dies gradually increased by 10 mm. At a stroke of over 10 mm, the coefficients of friction of the noncoated and hard-coated dies finally approached 0.52. From the results of the surface analyses, the adhesion of aluminum on the die surface was observed.

Key words: sheet metal forming, hot stamping, surface coating, aluminum-coated 22MnB5, coefficient of friction.

1. 緒言

自動車の環境問題を背景とした燃費向上, 衝突安全性能の向上への対応, 車体の軽量化の要求に対して, 車体骨格部品に超高張力鋼板の適用が検討されてきた¹⁾. 高張力鋼板のように引張強度が大きくなると冷間プレス成形では, 成形荷重, 成形性, スプリングバック, 工具寿命の低下, など問題が生じる. そこで, 最近ではホットスタンピング成形が適用されている.

ホットスタンピング成形は, 鋼板をオーステナイト域まで加熱し常温の金型で成形することで, 成形荷重及びスプリングバックを減少させ, 成形性を向上させるだけでなく, 金型内で急冷させることによる焼入れ効果もあり, 1500MPa を越える高強度の材料も得られる. 現在, ホットスタンピングによって自動車部品が製造されるようになってきており, 更に複雑な形状の部品への適用も試みられている^{2),3)}.

ホットスタンピングにより複雑な形状の部品を加工するためには, ホットスタンピングに関する多くのプロセスパラメータのデータが必要とされ, 鋼板の成形性⁴⁾⁻⁶⁾, 熱力学特性⁷⁾⁻⁹⁾などのプロセスパラメータを特定する研究が行われているが, トライボロジー特性のプロセスパラメ

ータである摩擦係数に対して適切な値を特定する研究はあまり行われていなかった. そこで, 筆者らは新しく熱間平板引抜き試験機を開発し, ホットスタンピングにおける摩擦係数を測定することを試み, ドライ条件において 0.5 を越える高い摩擦係数の値を得た^{10),11)}. 現在, ホットスタンピング成形の操業において, このような高い摩擦係数になることから工具摩耗や材料表面欠陥などを発生する問題が生じるため, 工具の改善が望まれている. 硬質膜を被膜した工具をホットスタンピング成形に用いると工具摩耗を改善することが報告されている¹²⁾⁻¹⁴⁾. しかしながら, それらの硬質膜を被膜した工具の摩擦特性についてはほとんど報告されていない.

そこで本研究は, ホットスタンピング用工具表面に鍛造などの熱間加工に実用されている TiN, TiCN, CrN, TiAlN および DLC-Si の 5 種類の硬質膜を被膜した工具と被膜なし工具を用いて, 熱間平板引抜き試験機でドライ条件におけるアルミニウムめっき (以下アルミめっき) 高張力鋼板の熱間引抜き試験を行い, 摩擦係数を測定した. そして, 試験後に工具の表面観察及び EDX 分析を行うことによって, アルミめっき高張力鋼板のホットスタンピングにおける摩擦係数に及ぼす工具表面被膜の影響についての調査を行った.

2. 実験方法

2.1 熱間平板引抜き試験機

試験に用いた熱間平板引抜き試験機の概略図を Fig. 1

* 横浜国立大学工学部 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5
Graduate School of Engineering, Yokohama National University, 79-5
Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan.

** 横浜国立大学大学院工学研究院 機械工学専攻 同上
Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering,
Yokohama National University, ibid.

に示す。この試験機は、最大圧縮荷重が 200kN の油圧アクチュエータ、最大引抜き荷重 20kN および最大引抜き速度 30mm/s の引抜き装置ならびに加熱長さ 960mm で最高温度 1100°C まで設定可能な赤外線瞬間加熱炉から構成されている。試験機的主要仕様は Table 1 に示す。

Fig. 1 Schematic representation of simulation testing machine for hot stamping

Table 1 Specification of simulation testing machine

Compression load, P / kN	Max 200
Tension load, T_F / kN	Max 20
Drawing speed, V / mm·s ⁻¹	Max 30
Furnace temperature, T_f / °C	Max 1100

2.2 摩擦係数測定方法

摩擦係数を測定するための実験方法は、試験片を引抜き装置のチャック部にセットし、赤外線瞬間加熱炉で加熱する。試験片は、加熱炉設定温度 T_f で試験片加熱部が均一になるまで加熱し、保持する。その後、加熱保持された試験片を一定速度 V で移動させ、試験片加熱部が工具の真下を通過するときに、一定の圧縮荷重 P を負荷しながら引抜きを行う。そのときの圧縮荷重 P と引抜き荷重 T_F を測定し、摩擦係数は測定した圧縮荷重と引抜き荷重より、次式より算出した。

$$\mu = \frac{T_F}{2P} \quad (1)$$

2.3 実験条件

試験片には、板厚 2mm、板幅 22mm、板長さ 2000mm の寸法のアルミめっき 22MnB5 鋼板を用いた。その化学成分を Table 2 に示す。

試験工具には、材質が SKD61 で、工具高さ 12mm、平行部幅 20mm およびコーナー半径 5mm の寸法を有する工具を用いた。工具は成膜前に約 0.05 μ m Ra の表面粗さに仕上げ、PVD 法によって TiN、TiCN、CrN および TiAlN、CVD 法によって DLC-Si 被膜を成膜した。成膜した被膜の表面粗さと膜厚を Table 3 に示す。Fig. 2 には試験前の工具表面プロフィールを示す。工具は試験前に、エメリー紙 (#1500) で軽く研磨を行い、試験片と工具の表面をヘキサンをういて脱脂して試験に用いた。

実験条件は、加熱炉設定温度 720°C、引抜き速度 10mm/s、圧縮荷重 3.5kN、引抜き距離 40mm として、熱間引抜き試験を行った。圧縮荷重と引抜き荷重の測定値を用いて式 (1) より摩擦係数 μ を算出し、摩擦係数結果から引抜き距離の 10mm から 40mm 間の平均摩擦係数 μ_m を次式より求めた。

$$\mu_m = \frac{1}{L_2 - L_1} \int_{L_1}^{L_2} \mu dl \quad (2)$$

Table 2 Chemical compositions of Al-coated 22MnB5 (wt%)

C	Mn	Cr	B
0.22	1.2	0.15	0.002

Table 3 Conditions of surface coating

Coating	Surface roughness / μ m Ra	Film thickness / μ m
TiN	0.05	3
TiCN	0.05	3
CrN	0.04	3
TiAlN	0.04	3
DLC-Si	0.05	3

Fig. 2 Surface profiles of hard coating before drawing

ここで、 $L_1=10$ mm、 $L_2=40$ mm とする。

試験後、工具表面状態の調査を行うために、EDX 分析を備えた走査型電子顕微鏡を用いて表面観察と工具表面の元素分析を行った。

2.4 加熱特性

加熱炉設定温度 720°C において、試験片を加熱したときの加熱炉出口から $L_x=150, 300, 470$ mm の 3 測定点における試験片表面で測定された温度 T_s と加熱時間の関係を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、加熱時間が 200s 経つと試験片は 950°C 以上まで十分に加熱されて、オーステナイト状態になっていることがわかる。そして加熱時間 200s 以降で 3 測定点の温度に大きな差はなく、試験片温度が加熱範囲で均一であることを示している。試験片を 240s、加熱炉で加熱保持した後、引抜き速度 10mm/s で移動させた。

Fig. 4 には、試験片の移動距離に対する 3 測定点の温度プロフィールを示す。Fig. 4 の○印は、3 測定点が加熱炉から出て、引抜きが開始される温度を示している。各測定点において、引抜かれる点での試験片温度は約 700°C で、熱間引抜きの試験片温度はほぼ 700°C の一定温度で行われていることを示している。そして、試験片の冷却速度は約 15°C/s である。加熱炉設定温度 720°C、加熱時間 240s の条件で試験片温度を 950°C に加熱した鋼板の断面図を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、鋼板表面上のアルミめっき層は溶けずに存在し、末廣らが報告しているように 5 層の Al/Fe/Si 層が確認できる¹⁵⁾。さらに、同じ条件で加熱後の試験片の表面写真及び表面プロフィールを Fig. 6 に示す。

3. 実験結果

3.1 摩擦係数

5 種類の被膜工具と被膜なし工具を用いた熱間引抜き中の摩擦係数と引抜き距離の関係を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より被膜なし工具では、摩擦係数は引抜き開始後、引抜き距離 5mm まで急激に増加し 0.58 の値になり、それ以降は 10mm 付近まで減少し 0.52 の値になっている。引抜き距離 10mm 以降ではほぼ一定の値を示している。一方、被膜工

Fig. 3 Relationships between specimen temperature and heating time

Fig. 4 Relationships between specimen temperature and sliding distance

Fig. 5 Cross-section image of specimen heated at specimen temperature of 950 °C for 240s

Fig. 6 Surface micrograph and profile of specimen heated at specimen temperature of 950 °C for 240s

具では摩擦係数は被膜なし工具とは異なり、引抜き距離 10mm 付近まで直線的に上昇をしている。その傾きの値は、被膜工具の被膜の種類により異なり、TiCN, TiN, CrN, TiAlN, DLC-Si の順に低くなり、引抜き距離 10mm での摩擦係数は約 0.5 から 0.4 まで低くなっている。引抜き距離 10mm 以降は、それぞれの被膜工具は引抜き距離 40mm までほぼ一定か、徐々に増加し、40mm の地点でほぼ同じ 0.52

の値になっている。

Fig. 8 に、式(2)を用いて計算した被膜なし工具と被膜工具の平均摩擦係数を示す。Fig. 8 より、各工具の平均摩擦係数の値は、0.53 から 0.49 の範囲にあることがわかる。その中で、TiN, TiCN 被膜工具の平均摩擦係数は被膜なし工具とほぼ同じ値を示している。一方、CrN, TiAlN および DLC-Si 被膜工具の平均摩擦係数は、被膜工具よりわずかに低い値を示している。しかし、被膜工具の被膜の種類によって平均摩擦係数に大きな差を確認することはできない。

3.2 SEM 観察/EDX 分析

試験片と工具界面の接触状態を評価するため、引抜き試験後の工具表面の SEM 観察と EDX 分析を行った。Fig. 9 に被膜工具表面の SEM 画像及び EDX 分析結果を示す。Fig. 9 の SEM 画像と Al 原子の EDX 分析から、被膜なし工具および TiAlN 以外の被膜工具表面は、熱間引抜き試験後においてアルミニウムの凝着が激しいこと、被膜工具においてアルミニウム凝着箇所の面積比や凝着量が被膜の種類によって異なることが確認できる。TiAlN 被膜に関しては、SEM 画像より他の工具と同様にアルミニウムが工具表面に凝着していることが理解できる。

3.3 表面プロフィール

工具表面へのアルミニウムの凝着の程度を定量的に理

Fig. 7 Relationships between coefficient of friction and sliding distance for 5 kinds of hard-coated and noncoated dies

Fig. 8 Mean coefficient of friction for 5 kinds of hard-coated and noncoated dies

解するために熱間引抜き後の工具表面のプロフィールの測定を行った。Fig. 10 に引抜き試験後の各工具表面のプロフィールを示す。Fig. 10 より、被膜なし工具の場合、アルミニウムの凝着厚さは大きいところで $5\mu\text{m}$ 以上もあり、部分的に厚く凝着していることがわかる。一方、被膜工具の場合では、各被膜工具の凝着厚さの大きなところでは、 $2\sim 3\mu\text{m}$ の厚さが確認できる。

熱間引抜き試験後の Fig. 9 の EDX 分析、Fig. 10 の工具表面プロフィール測定結果から凝着したアルミニウムの厚さが約 $2\mu\text{m}$ 以上で、その面積比が約 30% 以上になれば、摩擦係数値はアルミニウム同士の共金のドライ条件で示される値の約 0.5 以上になると思われる。

4. 考 察

ここでは、Fig. 7 の被膜なし工具および各種被膜工具の

Fig. 9 SEM micrographs and EDX analysis of contact region of die surfaces of 5 kinds of hard-coated and noncoated dies

Fig. 10 Surface profiles of die surfaces of 5 kinds of hard-coated and noncoated dies

摩擦係数の引抜き距離に伴う変化について考察を行う。

Fig. 11 に、被膜なし工具並びに TiN 及び DLC-Si 被膜工具の摩擦係数と引抜き距離の模式的な関係を示す。引抜き開始初期段階の区間をステージ 1 と 2 およびその後引抜き終了までの区間をステージ 3 と 4 に分割する。Fig. 12 及び Fig. 13 に引抜き試験後の試験片表面の 5, 10 および 20mm 地点の表面写真及び表面プロフィールを示す。

被膜なし工具と 2 種類の被膜工具で引抜き試験を行った引抜き初期段階のステージ 1 の引抜き距離 5mm での試験片の表面写真から、被膜なし工具では試験片表面に擦過傷、TiN 被膜工具ではアルミめっき層の突起部分の凝着による平坦化及び DLC-Si 被膜工具ではほとんど変化のない試験片表面が観察される。

表面写真から予想されたことは Fig. 13 の引抜き距離 5mm の試験片表面プロフィールと Fig. 6 の加熱後・引抜き前の表面プロフィールと比較からも確認できる。被膜なし工具では工具接触開始時に発生した激しい凝着によりアルミめっき層の表面に擦過傷を生じ、表面凹凸が著しく変化して小さくなっていることがわかる。一方、TiN 被膜工具ではアルミめっき層の突起先端部分が工具表面にそのほとんどが凝着してわずかに平坦化されていること、及び DLC-Si 被膜工具では試験片表面プロフィールが引抜き前の試験片表面とほとんど変化のないことが確認できる。

以上のことから、引抜き距離 5mm での被膜なし工具の摩擦係数がアルミニウム同士の共金によるドライ条件での摩擦係数より工具表面に激しく凝着したアルミニウムの凸部による掘り起こしの影響によりわずかに大きな値を示すことがわかる。一方、TiN 被膜工具ではアルミニウム同士の共金の摩擦係数の状態までに達しない程度アルミニウムの凝着により 0.4 程度の摩擦係数値を示し、DLC-Si 被膜工具ではわずかなアルミニウムの凝着により 0.3 以下の低い摩擦係数値を示したと思われる。

引抜き初期段階のステージ 2 の引抜き距離 10mm での試験片の表面写真及び表面プロフィールから、被膜なし工具では試験片表面に擦過傷、TiN 被膜工具では試験片表面にわずかな擦過傷及び DLC-Si 被膜工具ではアルミめっき層の突起のわずかな部分に凝着による平坦化がそれぞれ確認できる。

引抜き距離 10mm での被膜なし工具では安定した擦過傷を生じており、アルミニウム同士の共金によるドライ条件での摩擦係数値、TiN 被膜工具では擦過傷を呈するアルミニウム同士の共金によるドライ条件での摩擦係数値および、DLC-Si 被膜工具ではアルミニウム同士の共金の摩擦係数の状態までに達しない程度アルミニウムの凝着により 0.4 程度の摩擦係数値を示したと思われる。

引抜き中期段階のステージ 3 の引抜き距離 20mm での試験片の表面写真及び表面プロフィールから、被膜なし工具では試験片表面に擦過傷、TiN 被膜工具では試験片表面に擦過傷及び DLC-Si 被膜工具ではアルミめっき層の突起部の凝着による平坦化がそれぞれ確認できる。

引抜き距離 20mm での被膜なし工具では安定した擦過傷を生じており、アルミニウム同士の共金によるドライ条件での摩擦係数値、TiN 被膜工具においても安定した擦過傷を生じておりアルミニウム同士の共金によるドライ条

Fig. 11 Typical four tribological stages in hot flat drawing test

Fig. 12 Specimen surface at 5, 10 and 20 mm after drawing test

Fig. 13 Surface profiles of specimen at drawing distances of 5, 10 and 20 mm after drawing test

件での摩擦係数値および、DLC-Si 被膜工具ではアルミニウム同士の共金の摩擦係数の状態までに達しない程度のアルミニウムの凝着により 0.45 程度の摩擦係数を示したと思われる。

5. 結 言

- (1) 被膜なし工具の場合、試験片の引抜き距離 5mm において擦過傷を生じていることから、工具表面にアルミニウムが急激に凝着し、摩擦係数は工具表面の凝着物の掘り起こしの影響のため増加し 0.58 の値になった。引抜き距離 10mm では擦過傷を生じつつも摩擦係数はやや減少し、アルミニウム同士の共金による摩擦係数 0.52 の値になった。引抜き距離 20mm から 40mm においても同様の擦過傷を生じ、摩擦係数はアルミニウムの共金による 0.52 の値でほぼ一定であった。
 - (2) 被膜工具の場合、引抜き距離 5mm においてアルミニウムの凝着が起き、摩擦係数は直線的に増加した。被膜の種類によってアルミニウムの凝着の程度が異なり、摩擦係数の増加に差が生じた。引抜き距離 10mm では TiCN, TiN, CrN, TiAlN, DLC-Si の順に摩擦係数が低くなり、約 0.5~0.4 までの値になった。引抜き距離 10mm 以降から 40mm では摩擦係数はほぼ一定か漸増し、40mm 地点で被膜なし工具と同様にアルミニウムの共金による 0.52 の値になった。
 - (3) 被膜工具はアルミニウムが凝着し難いが、凝着が成長すると被膜なし工具と同等の摩擦係数に達する。
- 終わりに、本研究において試験片を御提供いただいた新日本製鐵(株)に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 林央：塑性と加工, **52**-606 (2011), 756-760.
- 2) 瀬沼武秀・竹元嘉利：塑性と加工, **52**-592 (2010), 28-33.
- 3) Karbasian, H. & Tekkaya, A.E. : J. Mater. Process. Technol., **210** (2010), 2103-2118.
- 4) Bariani, P.F., Bruschi, S., Ghiotti, A. & Turetta, A. : CIRP Ann., **57** (2008), 265-268.
- 5) Merklein, M., Lechler, J. & Geiger, M. : CIRP Ann., **55** (2006), 229-232.
- 6) Ghiotti, A., Bruschi, S. & Borsetto, F. : J. Mater. Process. Technol., **211** (2011), 1694-1700.
- 7) Merklein, M. & Lechler, J. : J. Mater. Process. Technol., **177** (2006), 452-455.
- 8) Merklein, M., Lechler, J. & Stoehr, T. : International Journal of Material Forming, **2** (2009), 259-262.
- 9) 中田匡浩・総田良之・小嶋啓達：第 61 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2010), 381-382.
- 10) Yanagida, A. & Azushima, A. : CIRP Ann., **58** (2009), 247-250.
- 11) Azushima, A., Uda, K. & Yanagida, A. : J. Mater. Process. Technol., **212** (2012), 1014-1021.
- 12) Hardell, J. & Prakash, B. : Tribol. Int., **41** (2008), 663-671.
- 13) Hardell, J. & Prakash, B. : Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, **28** (2010), 106-114.
- 14) Wieland, M. & Merklein, M. : Proc. 4th Int. Conf. Tribol. Manuf. Process., (2010), 261-270.
- 15) 末廣正芳・真木純・楠見和久・大神正浩・宮腰寿拓：新日鉄技報, **378** (2003), 15-20.