高温域における鋼板の摺動挙動

時田 裕一* 中垣内 達也*

玉井 良清* 稲積 透*

Sliding Behavior of Steel Sheets at High Temperature

Yuichi TOKITA *, Tatsuya NAKAGAITO *,

Yoshikiyo TAMAI * and Toru INAZUMI *

(Received on June 5, 2013)

The coefficients of friction of uncoated high-strength steel sheets and galvanized high-strength steel sheets were investigated by sliding tests at elevated temperatures using uncoated tools and TD-coated tools with a VC layer on their surface. The temperatures in the tests ranged from room temperature to 700°C. The coefficients of friction of the tested steel sheets at elevated temperatures are higher than those at room temperature. The coefficients of friction of the uncoated steel sheets are much higher than those of galvanized steel sheets. The phenomena during the sliding tests were clarified by observing the surfaces and cross sections of the tested steel sheets. The sliding behavior of the uncoated high-strength steel sheets at high temperatures depends on adhesion to the tools and the scale on the steel sheets. For the galvanized high-strength steel sheets, the sliding behavior at high temperatures depends on the strength of the coating layer. The effects of different factors such as lubricant, surface conditions, adhesion to the tools, and material strength on the coefficient of friction were also examined in this study and presented in this paper.

Key words: sheet metal forming, tribology, friction test, lubrication, steel, adhesion, hot stamping, warm stamping.

1. 緒言

近年自動車業界では、車体の軽量化と衝突安全性を両立させるため、高強度鋼板を用いた部品開発が進められている。高強度鋼板は一般に軟鋼板に比べてプレス成形性が劣り、金型離型後の弾性回復による形状変化も大きい。そこで最近では、プレス成形性および形状凍結性の向上を目的として、鋼板を高温に加熱してプレス成形する温間成形¹⁾およびプレスと同時に焼入れ処理を行う熱間成形の諸特性に関する検討²⁾が盛んである。熱間成形はすでに実用化が進み、自動車部品への適用が拡大傾向にある。これらの工法ではプレス成形中の鋼板温度が高温であるため、(1) 鋼板表面の潤滑状態、(2) 金型と鋼板の凝着性(密着性)、(3) 鋼板表面性状(表面酸化皮膜、めっき層)、(4) 鋼板母材の機械特性等が室温成形に比べて変化していると考えられる。したがって、高温での摺動特性は室温とは異なり、その挙動を把握することは高温域でのプレス成形性評価や金型磨耗・寿命の予測において重要である。

これまで高温での摺動特性に関する研究として、平坂は量産成形時の金型温度上昇が摺動特性に及ぼす影響を調査

するため、金型温度を室温から 120°C の範囲で変化させ、金型温度上昇にともない潤滑油の粘度が低下し金型と鋼板の直接接触が起こりやすくなり摩擦係数が高くなることを報告している³⁾。中田らは熱間プレス用亜鉛めっき鋼板と非めっき鋼板の 800°C における摩擦係数を調査し、いずれも室温の摩擦係数に比べて大きく増加するが、非めっき鋼板の摩擦係数 0.5~0.7 に対し、亜鉛めっき鋼板は 0.4~0.5 程度で亜鉛めっき鋼板の方が高温摺動特性に優れることを報告している⁴⁾。さらに、熱間成形時の摺動特性に及ぼす金型表面粗さやスケール厚さの影響、潤滑剤の効果に関する研究^{5)~7)}など、高温での摺動特性に関しては多くの研究が報告されている。しかしながら、その温度域は生産現場での金型温度変化を想定した比較的低い温度範囲(室温~100°C 程度)や、逆に熱間成形を想定した高温域(700~800°C)に限定されたものが多く、室温から高温までの広い温度範囲における摺動挙動の変化を系統的に調査しそのメカニズムを詳細に報告した例は少ない。

本研究では著者が検討した 980MPa 級熱延薄鋼板を用いた温間成形¹⁾の温度域における鋼板の摺動挙動を評価するため、室温~700°C の温度域で摺動特性に及ぼす摺動温度、鋼板表面処理、金型表面処理の影響を調査した。それらの結果から高温域における摺動挙動に及ぼす各因子の影響を明確にした。

* JFE スチール(株), 〒260-0835 千葉市中央区川崎町 1 番地
JFE Steel Co., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260-0835, Japan.

2. 試験方法

2.1 供試材

引張強さ 980MPa 級の析出強化型非めっき熱延鋼板（以下 HR 鋼板とする）および目付量 45g/m² の合金化溶融亜鉛めっき鋼板（以下 GA 鋼板とする）を用いて高温摺動特性を調査した。供試材の室温における機械的特性を Table 1 に示す。また、高温での引張強度を Fig.1 に示す。

Table 1 Mechanical properties of materials

Steel	t/mm	YS/MPa	TS/MPa	El/%
Hot rolled steel (HR)	1.6	1001	1038	17.7
Galvannealed steel (GA)	1.6	992	1015	15.0

Fig. 1 Tensile strength of specimen at high temperature

Fig. 2 Schematic diagram of high temperature sliding test

2.2 高温摺動試験

高温摺動試験装置の模式図を Fig.2 に示す。短冊形に加工した幅 10mm の試験片を摺動方向長さ 10mm の上下一対の工具で挟み、押付け力 2kN で荷重を負荷し、引抜き速度 100mm/s で試験片を引き抜いた時の引抜き力を摺動距離 150mm 間で連続的に測定した。摩擦係数 μ は押付け荷重 P 引抜き荷重 F より式(1)を用いて算出し、鋼板温度が均一である摺動開始から 50~140mm 間で平均化処理した。また、同じ条件下で 3 本ずつ試験を実施し、平均値を各条件における摩擦係数とした。

$$\mu = F/2P \quad (1)$$

工具材質は SKD61 の工具鋼とし、工具表面処理が摩擦係数に及ぼす影響を比較するため、硬質の VC 皮膜を工具表面に被覆する TD 処理を施した工具と表面処理を施さない工具を用いた。いずれの工具表面も引抜き方向の算術平均粗さ R_a は 0.04 μ m である。潤滑には 40°C における動粘度 10mm²/s、引火点 162°C の一般防錆油を用いて、片面あたり 2g/m² で両面に塗油した。

摺動試験装置に隣接して設置した加熱炉で試験片を加熱

し、目標加熱温度に到達した後、加熱炉から工具まで試験片を搬送し、工具を通過する直前の温度（以下、摺動温度とする）が室温(20°C)~700°C の範囲で摺動試験を行った。加熱時間は全ての条件で 240 秒一定とした。試験片の目標加熱温度は、試験片の中央部に熱電対を溶着し、種々の加熱温度で 240 秒間加熱した時の試験片の加熱・冷却挙動を測定した予備試験の結果をもとに、加熱炉から工具までの搬送時間における温度低下を考慮して目標の摺動温度になるように決定した。

各摺動温度での試験後の鋼板表面状態をマイクロ스코プを用いて観察した。また、摺動後のサンプルの摺動方向に対し平行な断面の表層を光学顕微鏡により観察した。

高温摺動時の防錆油の影響を検証するために、あらかじめ HR 鋼板をアセトン溶液で超音波脱脂し、摺動温度が室温~700°C までの温度範囲で TD 処理工具を用いて摺動試験を実施した。

2.3 熱処理サンプルの室温摺動試験

高温摺動試験と同じ条件で試験片を加熱し、室温まで空冷した後、室温下で摺動試験を行った。摺動試験条件は高温摺動試験と同じで、工具は TD 処理を施したものを用いた。熱処理サンプルは加熱による防錆油の残存状態、表面の酸化皮膜生成状態およびめっき層の相構造が高温摺動試験のサンプルと同等であると考えられる。よって、この試験と高温摺動試験の結果を比較することで、同じサンプル間で摺動温度が異なることの影響が検証できると考えた。

3. 実験結果

3.1 摺動温度が摩擦係数に及ぼす影響

Fig.3 に HR 鋼板と GA 鋼板について摺動温度と摩擦係数の関係を示す。HR 鋼板を TD 処理工具にて摺動試験した結果、摺動温度の上昇に対して 200~400°C の範囲で摩擦係数が増加し、400~700°C の範囲では $\mu=0.47$ 程度のほぼ一定値を示した。一方、表面処理なし工具では摺動温度が 100~300°C の範囲で室温に対して摩擦係数が大きく増加し、400~600°C では温度の上昇に対して摩擦係数は低下し、700°C で再び増加した。

一方、GA 鋼板の場合、200°C で $\mu=0.25\sim0.28$ 程度と室温に比べ増加している。300~600°C の温度範囲では 200°C より低下し、 $\mu=0.15\sim0.20$ 程度を示した。700°C で再び増加するが、HR 鋼板に比べて摩擦係数が大幅に低かった。

Fig. 3 Relationship between mean coefficients of friction and sliding temperature

GA 鋼板の場合は各摺動温度での摩擦係数に及ぼす工具表面処理の影響はほぼ見られなかった。また、摺動温度 600°C、工具面圧 5MPa の条件における TD 処理工具を用いた場合の摩擦係数は約 0.18 であることを確認しており、低面圧の条件下では摩擦係数に及ぼす面圧の影響は比較的小さかった。

3.2 HR 鋼板の表面および断面観察

Fig.4に TD 処理工具での摺動温度 600°C における試験後の工具表面を示す。摺動痕から、試験片と工具が摺動方向および摺動直角方向ともに均一に接触していることが確認できる。これは GA 鋼板においても同様であった。

Fig.5に HR 鋼板の摺動温度 300°C における摺動後の試験片表面を示す。TD 処理工具では擦り傷が確認される程度でかじりは確認されなかった。一方、表面処理なし工具では重かじりが発生し、表面が掘り起こされた痕が大きく残っている。TD 処理工具ではすべての摺動温度においてかじりは観察されず、表面処理なし工具では 300°C 以上のすべての条件でかじりが発生した。また、摩擦係数が最も高い 300°C でのかじりが最も大きかった。

Fig. 4 Surface appearance of TD coated tool after sliding test at 600°C

Fig. 5 Surface appearance of specimens after sliding tests at 300°C with (a)TD coated tool, (b) uncoated tool

Fig. 6 Microstructures of cross sections nearby surface of specimens after sliding tests at (a) 20°C with TD coated tool, (b) 300°C with TD coated tool, (c) 300°C with uncoated tool, and (d) magnified area of (c)

さらに、TD 処理工具を用いた室温摺動と両工具における摺動温度 300°C での摺動方向に対し平行な断面を **Fig.6**に示す。Fig.6(a)より、TD 処理工具を用いた室温摺動の条件では鋼板表層が塑性変形した様子は認められないが、Fig.6(b)で示すように 300°C では表層から約 2.5μm の領域で結晶粒が斜め方向を向き、材料がせん断変形を受けていることが確認できる。Fig.6(c)は表面処理なし工具のかじり発生部を示しているが、表層から約 20μm の領域で結晶粒が潰されており、TD 処理工具よりも強いせん断変形を受けたことが確認される。いずれの工具表面においても鋼板と工具との凝着性が室温より増加していることが推測できる。

3.3 GA 鋼板の断面観察

試験前および TD 処理工具を用いて 200°C、300°C、500°C で摺動試験を行った時の試験後の鋼板断面を **Fig.7**に示す。試験前および摺動温度 200°C ではめっき層の凹凸が観察される。300°C、500°C ではめっき表層の凹凸がつぶされて平坦化されている領域が多かった。そこで、摺動試験前後での各摺動温度における鋼板表面の粗さ測定を行った。摺動後の粗さは摺動方向と垂直方向に測定した。また、摺動前の粗さは高温摺動試験と同じ条件で加熱し室温まで空冷した試験片を測定して求めた。**Fig.8**に摺動前後での試験片の算術平均粗さ R_a の比較を示す。摺動前は、室温から 600°C の温度域で R_a はほとんど変化せず、700°C で大きく増加する。摺動前後での R_a を比較すると室温～200°C の温度範囲ではほとんど変わらないが、300～700°C の温度範囲では摺動後の R_a が低下する。

Fig. 7 Cross section of GA-steel (a) before test, and cross sections after tests at (b)200°C, (c)300°C, and (d)500°C

Fig. 8 Surface roughness of GA-steel before and after sliding tests

3.4 防錆油が摩擦係数に及ぼす影響

Fig.9 に防錆油を塗布した試験片と超音波脱脂により無潤滑とした試験片を用いた時の摺動温度と摩擦係数の関係を示す。室温では無潤滑の方が摩擦係数が高くなるが、摺動温度上昇とともに潤滑の有無による摩擦係数の差が小さくなり 500°C 以上ではほぼ同等の値を示す。

3.5 熱処理サンプルの室温摺動特性

Fig.10 に HR 鋼板で TD 処理工具を用いた熱処理サンプルの室温摺動試験での摩擦係数を高温摺動試験の摩擦係数と比較して示す。高温摺動試験結果については、横軸に摺動温度を示しているが、熱処理サンプルの室温摺動試験結果については、加熱条件が等しい高温摺動試験における摺動温度を示している。温度の上昇とともに 300°C で高温摺動の摩擦係数が室温摺動より大きくなり、400~700°C の温度範囲においてはその差が拡大した。Fig.11 に高温摺動試験材と熱処理サンプルの室温摺動材の表層の断面を比較して示す。摺動温度 400°C の条件では、鋼板の表層付近に組織の塑性流動が見られるが、同じ加熱条件の熱処理サンプルの室温摺動の場合、塑性流動はほとんど観察されない。次に摺動温度 500°C の条件では鋼板表面に薄い酸化皮膜の形成が認められ、地鉄表層にわずかに塑性流動が観察された。さらに、摺動温度 600°C の条件では鋼板表層の酸化皮膜が厚くなり、平坦化している様子が観察され、地鉄組織に塑性流動は見られない。一方で 500°C、600°C と同じ加熱条件の熱処理サンプルの室温摺動ではいずれも酸化皮膜

Fig. 9 Effect of lubricant on mean coefficients of friction measured in sliding test at each sliding temperature

Fig. 10 Comparison of mean coefficients of friction measured in sliding tests at elevated temperature and at room temperature after being heated same conditions

が平坦化されている様子は見られない。

Fig.12 に GA 鋼板において HR 鋼板と同様に高温摺動試験と熱処理サンプルの室温摺動試験を行った時の摩擦係数を比較して示す。HR 鋼板とは反対に GA 鋼板は摺動温度 400°C 以上の高温摺動試験における摩擦係数の方が同じ加熱条件の熱処理サンプルの室温摺動における摩擦係数より小さくなった。

4. 考 察

4.1 HR 鋼板と TD 処理工具間の高温摺動挙動

試験結果から推定される摺動温度変化に対する HR 鋼板と TD 処理工具との接触状態を Fig.13 に模式的に示す。室温下において、鋼板の地鉄と工具間には防錆油が存在している。鋼板が高温になると表面の防錆油は気化し、無潤滑条件に近づく。Fig.9 で示したように、室温において超音波脱脂した無潤滑材の摩擦係数は $\mu=0.23$ 程度と防錆油塗布材に比べ増加した。しかしながら、摺動温度 300°C の摩擦係数は 0.23 よりさらに大きく増加した。また、Fig.10 で示

Fig. 11 Comparison of cross sectional microstructures after being heated and slid at each temperature and microstructures after being heated and slid at room temperature

Fig. 12 Comparison of mean coefficients of friction at elevated temperature and mean coefficient of friction at room temperature after being heated under same conditions

したように、摺動温度 200°C までは表面の潤滑状態および表面性状が同等であれば摩擦係数も同等であった。つまり、200°C 程度までは防錆油が消失し、鋼板が無潤滑状態に近づくことが主因で摩擦係数が増加すると考えられる (Fig.13(a))。300°C 以上では防錆油消失以外の要因が加わり摩擦係数が増加したと考えられる。

摺動温度 300°C、400°C では、Fig.6(b)、Fig.11(a-1)で示したように鋼板の表層部において塑性流動が観察された。Fig.11(a-2)の室温摺動においては鋼板の塑性流動は見られなかったことから、高温摺動中は温度上昇にともない鋼板と工具との凝着力が増加し、凝着を引き離すために材料を塑性変形させるほど大きな引抜き抵抗力が発生し、摩擦係数が増加したと思われる (Fig.13(b))。

Fig.11(b-1)、(c-1)より 500°C 以上では材料の塑性流動が 400°C と比較して小さくなり、表層の酸化皮膜が平坦化されていた。Fig.14 に摺動温度 300°C 以上での摺動後試験片の断面から表面酸化皮膜の厚みを測定した結果を示す。300°C では表面酸化皮膜はほぼ見られないが、400°C 以上でわずかに確認され、温度上昇にともない厚みが増加している。摺動温度 500°C 以上では鋼板表面の酸化皮膜が工具との直接接触を防ぐ効果を示し、400°C 摺動よりも材料の塑性流動が小さかったと思われる。つまり、400°C までは工具と鋼板表面との接触が支配的であったのに対し、500°C 以上では酸化皮膜の増加にともない、Fig.13(c)のように工具と酸化皮膜との接触が支配的になったと考えられ

る。酸化皮膜が平坦化されている様子が観察されたことから、工具が酸化皮膜を削り平坦化する抵抗力が主因となり摩擦係数が室温に比べて増加していると推察される。

また、Fig.11(b-2)、(c-2)で示したように熱処理サンプルの室温摺動では表面酸化皮膜が平坦化される様子は認められなかった。室温における酸化皮膜は硬質で脆いため、摺動され剥がれたと考えられる。

X 線回折により鋼板表面の鉄系酸化皮膜の組成を調査したところ、300°C でマグネタイト(Fe_3O_4)が観察され 400~600°C ではマグネタイトが主であるが表層にわずかにヘマタイト(Fe_2O_3)が存在していた。さらに 700°C ではヘマタイトが主成分となっていた。このように、鋼板表面性状は各摺動温度で異なり、400°C 以上の摺動温度域では、みかけ上摩擦係数がほぼ一定となっているが、温度によって鋼板の摺動挙動が異なっていると推察される。

各摺動温度における摩擦係数に及ぼす工具と鋼板の凝着性増加の影響と酸化皮膜組成の影響の寄与度を明確にすることが今後の検討課題である。

4.2 HR 鋼板と表面処理なし工具間的高温摺動挙動

表面処理なし工具を用いた場合は、TD 処理工具に比べて工具と試験片が金属接触しやすいため、摺動時に発生した凝着が大きく 300°C 以上の温度域ではすべての条件でかじりが発生し、摩擦係数が顕著に増加した。Fig.5(b)に示したように摺動後のかじり痕が非常に大きく材料が掘り起こされていた。さらに温度上昇にともない凝着力が増加すると考えられるが、一方で材料強度が低下するため掘り起こし抵抗が低下することと、同時に表面酸化皮膜生成量が増え、酸化皮膜との接触が支配的となることが複合的に作用し摩擦係数が低下すると推察される。

いずれの工具においても、300°C 以上での鋼板の引き抜き抵抗は、工具との凝着を引き離すせん断抵抗、表面酸化皮膜が平坦化される抵抗力、材料が掘り起こされる抵抗力によって摩擦係数が決定されるが、工具の表面処理と摺動温度によって各因子が複合的に作用していると推察される。

4.3 GA 鋼板の高温摺動挙動

各摺動温度域での GA 鋼板と工具の接触状態を Fig.15 に模式的に示す。Fig.3 より、GA 鋼板は摩擦係数に及ぼす工具表面処理の影響がほぼ見られなかったため、工具と GA 鋼板の摺動挙動は表面処理によらず同等と考える。

摺動中に工具と直接接触していると思われるめっき層最表面の加熱による変化を調査した。本研究に用いた GA 材のめっき層中の Fe%は 10%程度で、めっき層は Fe-Zn 金属間化合物の δ_1 相で形成されている。X 線回折による摺動試験後のめっき層構造の調査より、室温~500°C においてはめっき相構造に室温から大きな変化は見られなかった。600°C で Γ 相が検出されるが最表層は δ_1 相であった。700°C ではさらに Γ 相が増加し、最表層に酸化亜鉛が検出された。

摺動温度が室温~200°C の範囲では、Fig.15(a)のように鋼板と工具間に防錆油が存在していると思われる。この温度域ではめっき層の相構造は δ_1 相から変化しないため、摩擦係数に及ぼすめっき相構造の影響は小さく、HR 鋼板と同様に鋼板表面の防錆油が消失し無潤滑状態に近づくことで摩擦係数が増加すると推定される。

Fig. 13 Schematic diagram of contact behavior between steel sheet and TD coated tool at each temperature

Fig. 14 Scale thicknesses of specimen after sliding tests

摺動温度 400~600°C の範囲では Fig.12 で示したように、高温摺動の摩擦係数に対し、同じ加熱条件の熱処理サンプルの室温摺動試験における摩擦係数の方が大きい。室温下で δ_1 相は脆いが、400°C 以上では延性を有すること、まためっき強度が温度上昇とともに室温に比べ大きく低下し、600°C では降伏応力が 10MPa 程度であることが報告されている⁸⁾。Fig.7 より、300°C 以上の摺動温度域では摺動前に比べて摺動後の表面が平坦化している。これは、高温中の δ_1 相の強度が低下しているため、めっき表層が工具によって潰されやすく Fig.15(b) のように平坦化されたものと考えられる。平坦化される変形抵抗が小さくなったことにより引抜きに要する力が小さくなり摩擦係数が低下したと推定される。一方で熱処理サンプルの室温摺動では加熱条件 400°C 以上で高温摺動試験より摩擦係数が大きく、摺動後の試験片の断面観察でもめっき層が潰され平坦化している様子は観察されなかった。これは室温と高温でのめっき層の強度の違いが影響したと思われる。つまり高温中の δ_1 相を潰し平滑化する抵抗力の方が室温のすべり抵抗より小さいと考えられる。GA 鋼板においても 300°C 以上での鋼板の引き抜き抵抗は室温でのすべり摩擦と異なり、表層のめっき層を平坦化するもしくは削り取る抵抗力で決定付けられていると考える。また、めっきが剥がれ母材が変形している状態は確認されなかったため、HR 鋼板とは異なり、母材強度の影響は少ないと考えられる。最後に、700°C では Fig.15(c) のように最表層に生成した酸化亜鉛が摩擦係

に影響していると考えられるが、酸化亜鉛が摺動特性に及ぼす影響については今後の検討課題である。

5. 結 言

- (1) HR 鋼板の TD 処理工具を用いた試験において、摺動温度 100~200°C では温度上昇にともなう鋼板表面の防錆油消失が主因で摩擦係数が増加する。300°C 以上では工具と鋼板の凝着力増加により摩擦係数が増加傾向にある。500°C 以上では鋼板表面に酸化皮膜が生成し始め、軟質化した酸化皮膜が平坦化される抵抗力に依存し摩擦係数が決定づけられていると推察される。
- (2) HR 鋼板と表面処理なし工具間の摺動において、300°C 以上では、材料が掘り起こされるほど大きなかじりが発生するが、温度上昇にともない材料強度低下と表面酸化皮膜生成の影響で摩擦係数は低下傾向にある。
- (3) HR 鋼板は TD 処理工具を用いた方が表面処理なし工具より高温での摩擦係数が小さい。
- (4) GA 鋼板は HR 鋼板と比較して温度上昇にともなう摩擦係数の増加が小さい。また、摩擦係数に及ぼす工具表面処理の影響がほとんど見られない。
- (5) GA 鋼板の場合、300°C 以上ではめっき層が平坦化される抵抗力が摩擦係数に及ぼす影響が大きく、室温に比べめっき層強度が低いいため摩擦係数が低下する。

参 考 文 献

- 1) 中垣内達也・時田裕一・玉井良清・稲積透：第 63 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2012), 75-76.
- 2) 例えば, Karbasian, H. & Tekkaya, A.E.: J. Mater. Process. Technol., **210** (2010), 2103-2118.
- 3) 平坂正人：塑性と加工, **28**-319(1987), 799-804.
- 4) 中田匡浩・富士本博紀・内原正人・今井和仁・小嶋啓達・総田良之：自動車技術会学術講演会前刷集, No.21-11, (2011), 5-8.
- 5) 宇田紘助・柳田明・小豆島明：平成 22 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2010), 41-42.
- 6) 柳田明・田中雄大・小豆島明：材料とプロセス, **23** (2010), 1071.
- 7) 宇田紘助・小豆島明・柳田明：第 62 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2011), 281-282.
- 8) Hong, M. H. & Saka, H. : Acta Mater., **45**-10 (1990) , 4225-4230.

Fig. 15 Schematic diagram of contact behavior between galvanized steel and tool at each temperature