塑性加工における適合性と潤滑剤の相乗効果*

河合 望**, 堂田邦明**, 養原和彦***

Interaction between Compatibility and Lubricity in Metal Forming

by Nozomu KAWAI, Kuniaki DOHDA, and Kazuhiko MINOHARA

Mild steel strips are ironed by various kinds of tool material, that is, alloy tool steel SKD 11, cemented carbide V2, ceramic Si_3N_4 and surface treated SKD 11 by diffusing coating VC, and with some oiliness agents and extreme pressure additives, using the strip-ironing type friction testing machine. The influence of ironing travel, ironing reduction and lubricity of some kinds of lubricants on galling behaviours are examined, and the combined effects of compatibility and lubricity are clarified. Galling types, which are peculiar to die materials, cannot be effected by the above three factors. The effects of decreasing the friction coefficient do not appear in the case of Si_3N_4 and VC, but they appear clearly for SKD 11. Improvement in limiting ironing reduction for galling are recognized for V2.

Key Words: Forming, Tribology, Friction Testing Apparatus, Friction Coefficient, Compatibility, Galling, Lubricant, Tool Materials

1. 結 言

前報⁽¹⁾では、しごき形摩擦試験機を用いて軟鋼板と各種工具材料の適合性の検討を行った。その結果、各種工具はそれぞれ固有の焼付き状態を示し、工具鋼類では面状焼付き、超硬類では線状焼付き、セラミック類ではまだら状焼付き、表面処理鋼類では出口部焼付き形の四つのタイプがみられた。そして、まだら状焼付きおよび出口部焼付きを呈する工具材では、摩擦係数が高くなっても、顕著な焼付きは発生せず、製品表面あらさも極めて小さく、このような工具材が適合性に優れるものと判断された。この試験では、適合性を明確にみるため、潤滑剤は非活性の流動パラフィンのみが用いられた。

本報では、これらの焼付き形がいつどのように発生し、そして成長してゆくのか、その挙動に対してしごき率、潤滑剤はどのように影響するのかを検討しながら、適合性と潤滑作用の相互作用を明らかにする。

2. 実 験 条 件

実験には前報と同一のしごき形摩擦試験機⁽²⁾を用いる。その詳細はすでに報告済であるので、ここでは図1に試験機の構造原理のみを示す。しごき加工中ダイス面上に作用する垂直力 N_d および摩擦力 F_d をしごき行程 h に対して連続的に同時記録する。

主な加工条件を表1にまとめて示す。ダイス角 α は 10° 一定で、しごき率 R_e は5%から、いずれの工具でも焼付きが発生する43.8%の範囲で試験を行う。温度効果、動水力学的効果をできるだけ小さくするために、しごき速度は1 mm/sの低速で一定とする。試験片は、厚さ0.8 mm、幅10 mm、長さ450 mm（ただし、最大しごき距離300 mm）の帯板を冷延鋼板から圧延方向に採取し、長手方向に2000番エメリー紙でポリッシュ処理を施し、アセトンで十分脱脂した後試験に供する。実験は恒温室内で行い、同一条件で複数回繰返し、すべての結果を検討の対象とする。

図2に前報で得られた焼付き形モデル⁽¹⁾を示す。面状焼付き形〔図2(a)〕は素材の凝着が面状に成長したもの、線状焼付き形〔図2(b)〕はダイスエッジ部から線状に現れるもの、まだら状焼付き形〔図2(c)〕はダイス面出口近傍にまだら状に生成するもの、および

* 昭和60年5月23日 昭和60年度塑性加工春季講演会において講演、原稿受付 昭和60年7月24日。

** 正員、名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

*** 准員、三菱重工業(株) (〒455 名古屋市港区大江町)。

出口部焼付き形 (図 2 (d)) はダイスエッジ部のみに局在するものである。本研究ではこれらの焼付きタイプを示す各種工具材料のうち、面状焼付き形を示すものから合金工具鋼 SKD 11、線状焼付き形から超硬合金 V 2、まだら状焼付き形からセラミック Si_3N_4 および出口部焼付き形から溶融塩浸漬法による VC 炭化物層皮履工具 (母材; SKD 11) ⁽³⁾ をそれぞれ代表例として選び実験に用いる。

表 2 に工具材料および加工素材性質をまとめて示す。表 3 に供試潤滑剤を示す。基油として、低粘度で極性に乏しい流動パラフィン L 2 とパラフィン系鉱油 PO 1 を用いる。添加剤として、油性向上剤 3 種 (ラウリン酸 (L. Ac.), ラウリルアルコール (L. Al.) およびラウリン酸メチル (L. Me.)) および極圧添加剤 3 種 (硫化油脂 (S. F. A.), トリクレジルフosphate (T. C. P.) および塩素化パラフィン (C. P.)) を供試する。いずれの添加剤も流動パラフィン L 2 に 1 wt % 添加して試験に供する⁽⁴⁾。

3. 焼付き性状に及ぼす加工条件の影響

3・1 しごき行程に伴う焼付き挙動の変化 図 3 に、L 2 潤滑でいずれの工具でも焼付きが生成する高しごき率 (36.7~43.0 %) における摩擦係数-行程線図

表 1 加工条件

Reduction in area	5-43.8%	Lubricant	Table 3
Die angle	10°	Dimension of work metal	thickness: 0.8 mm width : 10 mm
Ironing velocity	1 mm/sec	Temperature	20±1°C
Ironing travel	300 mm	Humidity	55±5%

図 1 試験機構造原理

(μ - h 線図) の代表例を示す。SKD 11, V 2 および Si_3N_4 では $h=15$ mm までに摩擦係数 μ は約 0.3 程度まで急増し、その後行程の進みに伴い SKD 11 では脈動しながら漸増, V 2 ではほぼ一定, Si_3N_4 では約 0.3 から 0.4 の範囲で脈動している。VC では全行程を通して $\mu < 0.2$ と低く、いわゆる低摩擦一定形を示している。図中の丸印は摩擦面観察行程を示す。

図 4 に V 2 の場合を代表例として工具摩擦面 SEM 観察結果を示す。図中の I. D. はしごき方向を表す。しごき開始直後の $h=5$ mm では、1 箇所焼付きらしきものがみられるが、その他の全摩擦面はほぼ境界潤滑状態にあるものと思われる。摩擦係数急増行程途中の $h=10$ mm では、ダイス出口部から、幅約 0.02 mm, 長さ約 0.1 mm 程度の線状の素材の凝着が発生している。摩擦係数定常行程初期の $h=50$ mm では、凝着部はダイス入口に向かって線状に著しく成長している。最終行程 $h=300$ mm では、長さ方向の成長はほとんど見られず、幅方向にわずかに成長しているものの、摩擦係数はほとんど変化しない。このように、焼付きの発生、成長では、行程を通して同一の焼付き形

表 2 工具材料および加工素材

Tool	Alloy tool steel SKD11 Cemented carbide V2 Ceramics Si_3N_4 Surface treated VC	Rapped $R_a = 0.02 \sim 0.04 \mu\text{m}$
Work metal	Mild steel SPCE $S_t = 308.9 \text{ MPa}$ n-value; 0.224, r-value; 1.59	Polished $R_a = 0.05 \mu\text{m}$

表 3 供試潤滑剤

Mineral oil	Liquid paraffin L2 ($19.78 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) Paraffinic oil PO1 ($3.32 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)
Oiliness agents	Lauric acid L.Ac. Lauryl alcohol L.Al. Methyl laurylate L.Me.
Extreme pressure additive	Sulfurized fatty acid S.F.A. Tricresyl phosphate T.C.P. Chlorinated paraffin C.P.

図 2 工具摩擦面における焼付き形モデル

を維持していることがわかる。ここには示さないが、他の工具でも、行程を通してそれぞれ固有の焼付き形が維持されることを確認した。

各工具がそれぞれ固有の焼付き形を呈する原因は、工具表面の成分あるいは組織と素材間の親和性に求められるはずである。V2では結合剤のCoが表面に露出すると、Feとの親和性が高いため、Co露出度の高い部分が核となって線状に焼付き層が伝ば成長するものと思われる。Si₃N₄ではFeとの親和性は元来低いが、通常の金属表面に比較しある程度ポーラス部が存在するため高しごき率では摩擦条件の厳しいダイス出口部近傍に比較的弱い物理的凝着層が現れ、この層の行程中の着脱が摩擦係数の脈動をひきおこすものと思

われる。VCでは親和性は低く表面仕上がりも良好なため摩擦条件の最も厳しいダイス出口部のみにわずかに焼付き層が生成するものと思われる。SKD11では親和性が比較的高いため、凝着は面状に伝ば成長するものと考えられる。これらの焼付き発生機構の詳細については、現在検討中で後報に報告の予定である。

3.2 しごき率の影響 しごき率を種々変更した場合の $h=300\text{ mm}$ における摩擦係数 μ_{300} としごき率の関係を図5に示す。図中の番号を付したのについて摩擦面観察を行った。SKD11では $R_e=5\%$ 付近で μ 値は0.08程度で極めて低いが、しごき率の増加に伴い急増し、しごき率が35%まで高まると μ 値は0.6~0.8にまで達してやがて飽和する。V2では $R_e \approx 20\%$ 程度までは $\mu \leq 0.1$ の低摩擦を示すが、20%以上では μ 値が増加し始め、 $R_e \approx 30\%$ で0.4程度に達し、飽和する。Si₃N₄ではしごき率の増加に従って μ 値は漸増し、 $R_e=43.8\%$ の高しごき率でも $\mu=0.33$ と比較的低い値を示す。VCでは $R_e=35\%$ 程度までは $\mu \approx 0.1$ の低摩擦が保たれるが、それ以上では μ 値はわずかに増加するものの、 $\mu \approx 0.18$ 程度の低い値を示す。

図6にV2およびVCの場合を例にとって、しごき率増加に伴う素材摩擦面変化を万能投影機により観察した結果およびしごき後の素材表面のあらさ曲線を示す。写真に付した番号はそれぞれ図5の実験値に付した番号に対応する。V2〔図6(a)〕についてみると、(1) $R_e=7.0\%$ では、 $\mu_{300}=0.09$ で加工後の素材表面は $R_a=0.2\text{ }\mu\text{m}$ 程度のいわゆる擦過傷面⁽⁵⁾となり、摩擦面には焼付きによるむしれは全くみられず、しごき

図3 しごき行程に伴う摩擦係数変化 (L2潤滑)

図4 しごき行程に伴う焼付き成長 (V2工具摩擦面, $R_e=39.0\%$)

図5 しごき率と摩擦係数の関係 (L2潤滑)

行程を通して境界潤滑状態を経過したものと思われる。 μ 値が 0.14 に増加する (2) $Re=20.9\%$ では、線状焼付きが出口近傍に発生しており、加工後素材表面は線状むしれ面となっている。 μ 値がわずかに高く 0.18 程度の (3) の場合もほぼ同程度の焼付き状態となっていることが確かめられた。 μ 値が 0.37 になった (4) $Re=30.7\%$ では、摩擦面に線状むしれの顕著な成長がみられ、加工後素材表面は激しい面状むしれ状態となっている。このように、しごき率が増し、焼付き程度が激しくなっても、焼付き形は変わらず線状形である。

つぎに VC [図 6 (b)] についてみると、(2) $Re=21.6\%$ では μ 値は 0.10 と低く、摩擦面には全くむしれはみられず、行程中境界潤滑状態を経過したものと思われる。 μ 値が 0.16 とわずかに増加した (3) $Re=36.1\%$ では摩擦面出口部に焼付きによるむしれが発生している。(4) $Re=41.2\%$ としごき率が増加しても、 μ 値は 0.17 と極めてわずかしき増加せず、焼付きによるむしれも出口部のみに集中しいわゆる出口部焼付き形を呈している。

このように、焼付き形は個々の工具材に固有で行程中変わらないが、摩擦係数はしごき率増加に伴い増加し、やがて飽和する。これは焼付きの発生と成長およびその飽和に対応している。そこで、摩擦係数増加の起点となるしごき率を焼付き発生限界しごき率 Re_{cr} として定義し、後に検討の対象とする。摩擦係数が漸増する Si_3N_4 については万能投影機による観察では不明瞭なため、 $\mu_{300}-Re$ 線図 (図 5) における (3)、

(4)、(5) の素材摩擦面を SEM 観察し、その結果を図 7 に示す。(3) $Re=30.7\%$ では、 μ 値は 0.23 と比較的高いものの、摩擦面には焼付きらしきものは全くみられない。(4) $Re=40.5\%$ では、 μ 値は 0.28 とわずかに増加しており、摩擦面には焼付きによるまだら状のむしれが散在している。(5) $Re=43.8\%$ になると、 $\mu_{300}=0.33$ と多少高まりむしれの数もわずかに増加しているが、(4) とほぼ同程度のまだら状を示している。これらの表面観察から、 Si_3N_4 で初めて焼付きが認められる μ_{300} を 0.25 とみなし、その時のしごき率を Re_{cr} とし、後に検討の対象とする。また、この場合もしごき率が増加しても焼付き形の変化が生じないことが確認されている。上述のように、しごき率が増加しても工具材に固有の焼付き形は変わらないことが確かめられた。同様の結果は SKD 11 でも認められている。

3.3 潤滑剤の影響 潤滑剤を変更した場合の素材摩擦面観察を万能投影機により各ダイスについて行ったが、ここでは V2 の場合を代表例として図 8 に示す。パラフィン系鉱油 PO1 [図 8 (a)]、油性向上剤ラウリン酸メチル [図 8 (b)] および極圧添加剤トリクレジルフォスフェート [図 8 (c)] を用いたいずれの場合も、基油 L2 [図 6 (a) (4)] の場合と同様に、摩擦面には線状焼付きによる線状むしれが発生しており、焼付き形は潤滑剤の影響を受けないことがわかる。他の工具でも、摩擦面性状の観察により、工具材に固有の焼付き形は潤滑剤の影響を受けないことが確

図 6 しごき率増加に伴う素材摩擦面変化 (L2 潤滑)

認された。

4. 各種工具に対する添加剤効果

4・1 減摩効果 図9に各種添加剤を用いた場合の μ - h 線図を示す。図9中の μ - h 曲線は同一実験条件での複数の実験結果の中から平均的なものを選んで示したものである。SKD 11では、油性向上剤のL. Me. およびすべての極圧添加剤で著しい減摩効果が現れている。特にS. F. A. およびT. C. P. が全行程を通して $\mu \approx 0.2$ 程度の低摩擦一定形を示している。V2では、適合性が元来良好なため基油L2のみでも摩擦係数は行程中漸増するもののたかだか0.3程度までしか増加しない。SKD 11の場合と同様、L. Ac. およびL. Al. が他の添加剤より多少劣っているようである。その他の添加剤ではいずれも減摩効果が現れ、 μ

$=0.1 \sim 0.2$ の低摩擦一定形となっている。Si₃N₄では、いずれの場合も行程初期で摩擦係数はわずかに増加するものの、行程後半には $\mu \approx 0.2$ 程度の定常値に落ち着く。そして、添加剤間の優劣はほとんど見い出せない。VCではL2のみでも $\mu \leq 0.2$ の低摩擦一定形を示すため、添加剤の効果はほとんど現れず、いずれの場合も $\mu \leq 0.2$ の低摩擦一定形を示している。 μ - h 線図における摩擦係数低減効果は適合性の不良なSKD 11で最も明瞭に現れ、ついでV2、また適合性に優れるSi₃N₄およびVCではほとんど現れない。

ここで、各種添加剤の減摩効果を定量的に比較するため、添加剤ごとに μ_{300} の値をみたのが図10である。SKD 11では極圧添加剤により μ_{300} は約0.8から0.2へと大きく低下し、減摩効果が著しい。またSi₃N₄およびVCではいずれも添加剤による減摩効果はほとんど現れない。効果が現れるSKD 11およびV2について詳細にみると、極圧添加剤のS. F. A. とT. C. P. が最も良好であり、ついでC. P. とL. Me. が良い。油性向上剤L. Al. とL. Ac. では減摩効果はほとんどみられない。

4・2 焼付き抑制効果 図11に焼付き発生限界しごき率に及ぼす添加剤効果を、L. Ac., L. Me. およびT. C. P. の場合について示す。SKD 11に対しては、いずれの添加剤とも基油よりわずかに向上するものの顕著な効果はみられない。これはSKD 11では素材との

図7 しごき率増加に伴う素材摩擦面変化 (Si₃N₄, L2潤滑)

図8 焼付き状態に及ぼす潤滑剤の影響(V2, 素材摩擦面)

図9 摩擦係数-行程線図に及ぼす添加剤の影響

 図 10 摩擦係数 (μ_{300}) に及ぼす添加剤効果

図 11 焼付き発生限界しごき率に及ぼす添加剤効果

適合性が不良で元来焼付きが発生しやすいため、良好な添加剤を用いてもその効果が及ばないためと考えられる。一方 Si_3N_4 および VC でも添加剤効果はほとんど認められない。これは、逆に、これらの工具材は元来適合性が良好であるため、添加剤効果が現れないものと考えられる。ほぼ中間程度の適合性を有する V2 では最も効果が顕著に現れており、L. Ac. でも R_{ecr} の向上がみられる。このことは L. Ac. では μ_{300} における摩擦係数低減効果には劣るが、焼付き発生限界しごき率向上効果には優れていることを示している。また、T. C. P. では両効果とも優れている。このように、油性向上剤では、いったん焼付きが発生すると減摩効果はそれほど期待できないが、焼付き発生限界しごき率の向上には有効である。極圧添加剤は両方ともに優れていることがわかる。

5. 結 論

しごき形摩擦試験機により、軟鋼板を各種工具材と潤滑剤を用いてしごき試験を行い、焼付き挙動に及ぼす、しごき行程、しごき率、潤滑剤の影響を検討して、適合性と潤滑剤の相互作用を明らかにした。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 前報で明らかにされた面状焼付き形 (SKD 11)、線状焼付き形 (V 2)、まだら状焼付き形 (Si_3N_4) および出口部焼付き形 (VC) の 4 種の焼付き形は、しごき行程、しごき率および潤滑剤のいずれの影響も受けず、工具材特有のものである。

(2) 添加剤効果を摩擦係数 μ_{300} の低減作用で評

価すると、適合性の良好な Si_3N_4 および VC では元来 μ_{300} は小さいため、減摩効果はほとんど現れない。適合性不良な SKD 11 では、極圧添加剤により μ_{300} は 0.8 から 0.2 へと大きく減少する。本実験条件では極圧添加剤のほうが油性向上剤より減摩効果が良好である。一方、焼付き発生限界しごき率で評価すると、 Si_3N_4 および VC では元来焼付きは発生し難いため添加剤効果はみられず、SKD 11 では元来焼付きが発生しやすいために添加剤効果も及ばない。中程度の適合性をもつ V2 では添加剤により焼付き発生を抑制でき、その効果が顕著に現れる。

(3) 油性向上剤では焼付き発生後の摩擦係数を低減する効果は少なく、むしろ焼付き発生を抑制し、限界しごき率を向上させる効果のほうが優れている。一方、極圧添加剤では両効果ともに優れている。

本研究には、新日本製鐵(株)から軟鋼板を、三菱石油(株)から添加剤の提供を受けた。また豊田中央研究所(株) 新井透博士には工具表面処理のお世話をいただいた。さらに本研究は昭和 58 年度文部省科学研究費の補助を受けたものである。ここに付記して謝意を表す。

文 献

- (1) 河合・堂田・安田, 機論, 50-457, C (昭 59), 1664.
- (2) 河合・中村・宮本, 機論, 47-417, C (昭 56), 644.
- (3) 新井, 塑性と加工, 19-204 (昭 53), 88.
- (4) 河合・近藤・清水・中村, 機論, 37-301 (昭 46), 1788.
- (5) 河合・堂田, 塑性と加工, 25-285 (昭 59), 861.

討 論

〔質問〕 島 進〔京都大学工学部〕

詳細な実験結果興味深く拝見した。添加剤に関する結果について、お考えを伺いたい。

(1) 極圧添加剤は、温度が上がることによって、表面に皮膜を形成し、それによって摩擦係数が低下するといわれている。貴実験は、温度の影響を防ぐためごく低速でやっておられる。しかし、図9に見られるように、SKD 11 などでは、S. F. A., T. C. P., C. P. は、非常に減摩効果がある。どのような理由（機構）をお考えか。

(2) 工具材料の種類によって、添加剤（とくに極圧剤）の効果が異なる（図10）のは、もし、表面に被膜が形成されるとすれば、主に、それは、工具の表面と考えてよいか。

〔回答〕 (1) ご指摘のとおり一般に極圧添加剤はある程度の温度以上になると反応膜を生成し潤滑効果を表すといわれている。また、それらはある程度油性効果をも合わせ持つものと考えられている。本実験でも低しごき率で摩擦面にほとんど焼付きのない条件でも極圧添加剤の減摩効果がみられる。図9に示される高しごき率($R_e \approx 36.0\%$)では、工具面上には素材の凝着がみられ、いわゆる焼付きが生成しているが、極圧添加剤の添加により焼付き成長が抑制され、行程を通してほぼ一定の摩擦係数値となっている。摩擦面に焼付きが生成すると局部的温度上昇は当然考えられ、それによる極圧剤の反応作用と油性効果により減摩が生ずると考えられる。

(2) 工具が SKD 11 の場合は、適合性が劣り焼付きが発生しやすいため、図10にみられるように、L 2 では $\mu=0.8$ と高い。しかし、極圧剤添加によりその反応が顕著に現れて $\mu=0.2$ 程度に減少する。一方、適合

性のよい V 2 では、L 2 でも $\mu \approx 0.3$ と小さいが、焼付きは多少発生している。したがって極圧剤添加により、 $\mu \approx 0.08$ 程度まで低下している。このように、極圧剤の反応作用は工具と素材との組合せによって支配されるものとする。

〔質問〕 中 村 保〔静岡大学工学部〕

(1) 素材の種類によっても焼付き形態が異なると思われるが、その場合にも貴実験のような4種類に分類できると考えてよいか。

(2) 図9において、SKD 11 の場合の μ の値は 0.2 程度まで減少しているが、この場合の摩擦面はどのようなものであったか。図11では、この程度の μ でも焼付き発生が抑制されないと評価しているが、この減摩量は添加剤のどのような効果に起因すると思われるか。

〔回答〕 (1) 本文では、軟鋼素材についてのみ検討の対象としている。適合性は工具素材間の材質組合せによって支配されるので、材料が変わると素材固有の焼付き形が現れる可能性がある。今後、各種素材との適合性の検討を進める予定である。

(2) 図9の SKD 11 工具に T. C. P. 潤滑の場合、 $\mu=0.2$ 程度の比較的低い μ 値となっているが、工具面上には素材の凝着による焼付きがわずかに発生している。しかし、極圧剤添加により行程に伴う焼付き成長は抑制され、しごき行程を通してほぼ一定の μ 値となっている。図11は焼付きが初めて発生するしごき率すなわち限界しごき率により評価したものであるが、SKD 11 では極圧剤を添加しても限界しごき率にはほとんど変化がみられない。したがって、極圧剤の効果は焼付きの発生でなく成長を抑制するものと考えられる。