しごき加工による表面平滑化に関する研究*

河 合 望^{*1}, 堂 田 邦 明^{*2}
秋 山 和 洋^{*3}, 王 志 剛^{*1}

Research on Mirror Surface Finish by the Ironing Process

Nozomu KAWAI, Kuniaki DOHDA,
Kazuhiro AKIYAMA, and Zhrgang Wang

The object of this paper is to clarify the mechanism of mirror surface finishing by the ironing process. The mirror surface is needed for electrooptical parts such as optical drums, magnetic discs, etc., which are currently being finished by diamond turning lapping, etc. In the ironing process, the metal surface on the die-side becomes the rubbed surface ($Ra \approx 0.05 \mu m$). In the case of applying high viscous oil it is rather inferior to a die surface ($Ra \approx 0.006, 0.011 \mu m$) and when lower viscous oils are applied, galling often occurs. The metal surface on the punch-side nears a replica of the punch surface as the reduction increases under the dry conditions at the punch-metal interface. In this experiment, the metal surface was finished to $Ra = 0.004 \mu m$ under dry conditions on the punch-side, high viscous oil on the die-side and 50% in the reduction.

Key Words: Plastic Forming, Tribology, Press Working, Ironing, Aluminum, Extra-fine Surface

1. 緒 言

近年, 光学ドラム, 磁気ディスクなど電子光学機器関連の部品において高い寸法精度と高度の鏡面が必要とされている。従来, これらの部品の表面仕上げにはダイヤモンドバイトによる超精密切削, 研削, ラッピングなどが慣用されているが, これを塑性加工によって達成できれば, 生産能率の著しい向上とコストの低減が期待できる。

塑性加工では, 材料表面は成形に伴って創成され, その性状は工具面との摩擦現象の結果としてつくりだされるから, 塑性加工における材料表面平滑化には, 面圧, 摩擦せん断応力, 相対すべり量, 介在する潤滑剤, 工具と素材の表面性状と両材質間の適合性など極めて多くの因子が影響する。塑性加工における摩擦潤滑機構に関する研究は極めて多いが⁽¹⁾, 表面仕上げに狙いをおいた研究は必ずしも多くない。アルミニウム板の冷間圧延における表面仕上げ⁽²⁾⁽³⁾, 絞り-しごきにおけるアルミニウム缶の表面問題⁽⁴⁾⁽⁵⁾など, 潤滑機構

に関連して表面性状を検討した報告がみられる。平板あるいは缶体の塑性加工による鏡面創成には, 原理的には引抜き, 押出しなどいくつかの方法が考えられるが, ここでは, まず平板のしごき加工をとりあげて検討することとした。

上述の観点から, 本研究では, 帯板しごき加工装置を用いて工業用純アルミニウム板(A 1100-0 材)にしごき加工を加えると同時に, 表面仕上げをも行い, 製品加工と鏡面化の同時達成に関する最適条件を明確にすることを目的とする。

2. 実験条件

2.1 実験装置 本実験に用いる帯板しごき加工装置は, 既報のしごき形摩擦試験機⁽⁶⁾を改良したものである。ここではその要点のみ説明する。図1に本装置の加工原理を示す。带状素板①はポンチ④と一体で上方に引き上げられ, ダイス②によってしごき加工が加えられる。ダイス側では比較的大きな相対すべりを伴いながらダイス面との摩擦を介して製品表面が創成されるが, ポンチ側では素板とポンチ表面との間に面圧が負荷された状態で比較的微小の相対すべりを生じて表面が創成される。本研究では, 後述するようにポンチ側素板面の鏡面化が容易なため, これを目的加工

* 昭和62年10月7日 第38回塑性加工連合講演会において講演, 原稿受付 昭和63年12月5日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部(〒464 名古屋市千種区不老町)。

^{*2} 正員, 岐阜大学工学部(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。

^{*3} トヨタ自動車(株)(〒471 豊田市トヨタ町1)。

面とするが、ダイス側素板面も比較検討の対象とする。しごき率の変更はガイド軸受⑥を左右に移動することにより行う。しごき加工中ダイス面に作用する垂直力 N_D および摩擦力 F_D は測定体③によって分離測定され、しごき行程を通じて X-Y レコーダに同時記録される。

2.2 実験条件 表面仕上げへの主要影響因子として、本実験では、しごき率、ポンチ面表面あらさ、潤滑剤をとりあげた。これらを含む主な加工条件を表 1～3 にまとめて示す。しごき距離 h は摩擦係数 μ 値が定常値に達する 100 mm までとする。表 1 に示すように、しごき率 R_s は 5%～約 50% までの範囲で種々変更する。しごき速度は摩擦発熱による温度効果、動圧流体力学的効果をできるだけ小さくするため、1 mm/s の低速で一定とした。ダイス材料には、ダイス側の摩擦状態を変更するため合金工具鋼 SKD 11 および窒化けい素 (Si_3N_4) の 2 種類を作製し、表面にはラッピング加工を施し、それぞれ $R_a=0.011, 0.006 \mu\text{m}$ 程度まで仕上げた。ダイス出口には、わずかの丸味はついているが、ベアリング部は特にはつけていない。ポンチ材料には SKD 11 を用い、4 種の表面あらさのものを作製した。 $R_a=0.354 \mu\text{m}$ の最もあらい面はしごき方向への研削によって作製し、他はラッピング条件の変更により、仕上げあらさを調節した。最も平滑な面は超精密ラッピングにより $R_a=0.004 \mu\text{m}$ 程度に仕上げた。工具面には 1 試験ごとに再仕上げを施し、摩擦面を常に同一条件に保つよう努めた。表 2 に、供試素板 A 1100 の機械的性質および化学成分を示す。板厚 0.39 mm の軟質板から、幅 20 mm、長さ 200 mm の帯板を圧延方向に採取し試験用素板とする。表 3 に供試潤滑油性状を示す。粘度の異なるパラフィン系鉱油 3 種 (St, P 4, P 3) および流動パラフィン 1 種 (L 2) を

用いる。潤滑油塗布条件を示すのに、以後たとえば、ダイス側潤滑油として St、ポンチ側潤滑油として L 2 を使用した場合には (D) St-(P) L 2 と記す。

工具および素板摩擦面をアセトンで十分脱脂した後冷風乾燥し、潤滑油を塗布して直ちに (2 min 以内) 実験を行った。同一条件で 3 回以上の実験を繰返し行い、すべての結果を検討の対象とした。実験室は温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $45 \pm 5\%$ に空気調和した。

3. 表面平滑化条件の検討

表面平滑化への影響因子としてとりあげたしごき率、ダイス面とポンチ面間の潤滑、およびポンチ面表面あらさに関して以下順次検討を加える。

3.1 しごき率の影響 図 2 は、表面あらさ $R_a=0.02 \mu\text{m}$ のポンチ②を用い、潤滑条件を種々変更して、しごき率増加に伴う製品表面あらさの変化をみたものである。表面あらさの測定には、触針式表面あらさ計を用いて、しごき行程 $h=100 \text{ mm}$ における素板面を、

表 1 しごき加工条件

Die semiangle α	10°
Ironing velocity	1mm/s
Ironing travel	100mm
Ironing reduction	5~50%
Tool materials (Surface roughness)	Die SKD11 ($R_a=0.011 \mu\text{m}$) Si_3N_4 ($R_a=0.006 \mu\text{m}$)
	Punch SKD11 $R_a=$ ① 0.004 ② 0.020 ③ 0.057 ④ 0.354 (μm)
Room temperature	$20 \pm 1^\circ\text{C}$
Room humidity	$45 \pm 5\%$

表 2 試験用素板 A 1100-0 材の性質と化学成分

Tensile Strength MPa	Elongation %	n-value	Surface roughness					
98.0	40.3	0.24	Ra μm	Rmax μm				
Chemical composition wt%								
Si	Fe	Cu	Mn	Ni	Cr	Zn	Ti	Al
0.15	0.59	0.07	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	0.01	99.15

表 3 潤滑油性状

Lubricant	L2	P3	P4	St
Viscosity ($10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}, 20^\circ\text{C}$)	19.8	70.9	321	5119
Sulphur weight%	0.00	0.15	0.25	0.95
Ring analysis C % (n-d-m method) C % C %	0.0 28.5 71.5	5.6 26.8 67.6	7.0 24.5 68.5	7.7 26.7 65.6
Mean molecular Weight	305	393	519	771

図 1 帯板しごき加工原理

しごき方向に垂直に測定した。

ダイス側素板面では、ダイス側に高粘度油 St 潤滑を行った場合には、工具材料、ポンチ側潤滑が変わっても例外なく、しごき率が約 10% をこえると、表面は $R_a \approx 0.05 \mu\text{m}$ 程度の擦過傷面となる。これが本実験範囲内では最良の表面仕上げとなったが、ダイス表面あらさ ($R_a = 0.006, 0.011 \mu\text{m}$) に比べてかなり劣るものである。既報⁽⁷⁾⁽⁸⁾の結果を参照すると、摩擦すべりが加えられる表面では、工具面による擦過傷はさけがたく、特別の手法を用いない限りこれ以上の仕上げは困難と思われる。ダイス側潤滑油が P 3, L 2 と低粘度化すると、しごき率増加に伴い焼付きが発生し、表面むしれが生じる。ただし、 Si_3N_4 ダイスでは、SKD 11 ダイスに比較し焼付きは極めて少ない。すなわち、ダイス面 L 2 潤滑の場合、SKD 11 ダイスでは激しい焼付きが発生し、しごき加工は全く不可能であったが、 Si_3N_4 ダイスを用いると部分的に焼付きが発生する程度となる。いずれにしても、図 2 にみるように、焼付きが発生すると、それによるむしれ部と擦過傷面が混在するため表面あらさのばらつきは著しく大きくなる。

ポンチ側素板面では、いずれの潤滑条件でも、しごき率の増加に伴い R_a は低下してゆく。ポンチ側が Dry (無潤滑) あるいは低粘度油 P 3 の場合にも焼付きは全く発生せず、 $R_a = 20\%$ になると、素板表面あらさはポンチ面の表面あらさ $R_a = 0.020 \mu\text{m}$ に接近する。しかし、ポンチ側潤滑油が St と高粘度になると R_a

は多少増加している。図 11 に後述するように、しごき率増加は工具・素板面間の面圧を低下させるが、相対すべり量を多少増加させる。上述の平滑化の機構に関する理解は現在必ずしも十分でないが、素板の巨視的塑性変形そのものが平滑化を助長するものとする説が有力と考えている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

図 3 および図 4 にしごき率の増加に伴うポンチ側素板表面性状変化の観察例および比較のためポンチ表面あらさを示す。図 3 に示す (D) St-(P) St 潤滑の場合、図 3 (b) から図 3 (e) へとしごき率の増加に伴い平滑化は進むが、 $R_a \approx 20\%$ (図 3 (e)) になっても素板表面には圧延模様が残存し、ミクロプールによる凹部(黒色はん点)がみられる。これは高粘度油による油膜厚さ増および流動性劣化によるものと考えられる。一方、図 4 に示す (D) St-(P) Dry 潤滑では、図 4 (a) から図 4 (c) へとしごき率増加に伴い素板の圧延模様は次第に消滅し、素板表面性状はポンチ表面性状に近づく。しごき率の増加に伴い、工具面転写による平滑化が進んでいるのがわかる。

3.2 しごき行程に伴う表面あらさ変化 図 5 は、しごき行程に伴うダイス側およびポンチ側素板表面あらさの変化およびダイス面摩擦係数 μ の変化を示すものである。前述のように、ダイス側では潤滑油が低粘度化すると、焼付きが発生し、表面あらさ、 μ ともに増加し変動も大きい。一方ポンチ側では、ダイス側の条件に大きな影響をうけることなく、行程 h が 20 mm をこえると R_a はほぼ定常化し、無潤滑あるいは低粘度 P 3 の場合にも焼付きは全く発生せず、 R_a はほぼポンチ面あらさ $0.02 \mu\text{m}$ へと収束している。しかし、ダイス側 μ , R_a の変動が著しい (D) L 2-(P) Dry の場合にはポンチ側表面あらさもわずかであるが変動することがわかる。

3.3 潤滑条件の影響 図 6 は、 $R_a \approx 20\%$, $h = 100 \text{ mm}$ における素板のダイス側、ポンチ側両面のあらさを潤滑条件ごとに示したものである。ここに示された結果は、定性的には前述の説明より明らかである。最良のダイス側素板面はダイス側潤滑油が高粘度油 (St) の場合に出現しているが、 $R_a = 0.05 \mu\text{m}$ 程度の擦過傷面である。ポンチ側素板面が最良となる条件は、ポンチ側無潤滑、ダイス側潤滑高粘度油 (St) の場合に出現しポンチ表面あらさ $R_a = 0.02 \mu\text{m}$ に接近していることがわかる。この場合には、 R_a の変動範囲も著しく小さくなっている。

しかし、ポンチ側を St 潤滑とした場合には、ダイス側の潤滑は低粘度化したほうが、ポンチ側素板面の R_a は低下することがわかる。このことは、ダイス側で

図 2 しごき率増加に伴う素板表面あらさの変化 ($h = 100 \text{ mm}$)

図 3 ポンチ側素板表面の性状変化 (ポンチ側潤滑: St)

図 4 ポンチ側素板表面の性状変化 (ポンチ側潤滑: 無潤滑)

図 5 しごき行程に伴う素板表面あらさの変化

図 6 潤滑条件としごき後素板表面あらさ

の高摩擦が接触面圧の上昇をもたらし、ポンチ側素板面の平滑化を助長するものと考えられる。そこで、(D)P3-(P)P3潤滑でダイス側に局所的な帯状焼付きを生じた場合についてダイス側とポンチ側の素板面の対応を図7によって詳細にみてみた。この実験では、ダイス側素板面中に生じた擦過傷面A'内に幅3~5mm程度のむしれ面B'が混在した。そのとき、裏面であるポンチ側素板面には、ダイス側むしれ面に対応する位置に目視による鏡面が出現した。図7の上に示すあらき曲線はダイス面側における上述2種類の表面を示し、下には、対応するポンチ側表面あらき曲線を示す。A'部の裏側部分AよりB'部の裏側部分Bのほうがあらさが小さくなっていることがわかる。肉眼観察によると、A部はやや白濁した擦過傷面であるが、B面は光輝面となっている。図8にA部およびB部の相対負荷曲線を示す。Aの白濁面よりBの光輝面が均一な平滑面となっていることがわかる。この結果は、鏡面化の一つの考え方を示唆するものとして興味深い。

3.4 工具面表面あらさの影響 表面あらさの異

図7 加工後の素板表面性状
(ダイス側とポンチ側の比較)

図8 光輝面と白濁面の
相対負荷曲線

なる4種類のポンチを用いた場合のしごき率とポンチ側素板表面あらさの関係を図9に示す。縦軸 R_a は対数目盛で示してある。ポンチ面を素板面よりあらくすることは、必ずしも素板表面仕上げの向上にはつながらないが、転写機構検討の参考とした。 $R_a=0.354\mu\text{m}$ とあらいポンチ④を用いた場合、しごき率の増加に伴い素板表面あらさは工具面あらさに近づき、しごき率 R_e 約20%で工具面とほぼ同程度となっており、ポンチ側潤滑Stと無潤滑の差はほとんどない。粗面化により油の流出が容易になったためと考えられる。この場合、工具面あらさは素板の表面あらさを($R_a=0.21\mu\text{m}$)より大きいため、素板面は転写により粗面化されることになる。ポンチ③、②、①と表面あらさが低下すると、ポンチ面への転写性はポンチ側Dry(無潤滑)の場合に良く、高粘度油Stの場合劣化し、介在する潤滑油の影響が強まる。超精密表面創成のために、SKD11工具鋼の表面仕上げ状態としてはほぼ限界に近いポンチ①($R_a=0.004\mu\text{m}$)を準備した。(D)St-(P)Dry潤滑の場合には、特にしごき率を41.3、49.1、52%と順次高めたところ、 $R_e=50\%$ でほぼ工具面と同程度の表面が得られた。

図10は、転写性とポンチ表面あらさの関係を素板とポンチの表面あらさの対数目盛表示で示したものである。ポンチ④および③とあらい場合には、しごき率20%で潤滑にほぼ無関係に、ポンチ面と同程度かあるいは多少とも良好な面が得られる。ポンチ面が平滑化するに従い、転写性を高めるため高しごき率が必要となるが、超精密仕上げポンチ面①でもしごき率約50%でほぼ完全な転写を達成し得ることがわかる。この結果から、原理的には素板表面は工具面と同程度の仕上げまでしごき加工による転写によって創成されるものと結論できる。しかし、しごきにより極薄板となるので、若干の曲がりの発生は避けられない。実用的には

図9 しごき率増加に伴う素板表面あらさ変化

図 10 ポンチ面あらしとポンチ側素板表面あらしの関係

図 11 しごき率とダイス接触面平均面圧、
ポンチ側相対すべり量の関係

ある程度剛な物体に接着して利用するような方法を考える必要がある。

4. 転写性

前述のように、しごき率を高めると転写性が高められるが、その理由を若干考察してみたい。

図 11 は、しごき率とポンチ側相対すべり量 l_p およびダイス面で測定された平均面圧 p の関係を示すものである。ここに、 l_p は素板がダイスに入ってから出るまでにポンチ面との間に生ずる相対すべり量で、平行変形を仮定した計算値である。相対すべり量はしごき率が 20% と高まって、0.055 mm 程度と微小である。しごき率増加に伴い面圧減少、相対すべり量の増加が生じ、それぞれ 3 因子が表面平滑化に影響するものと思われるが、本実験条件下では、これらを独立には制御し難い。3 因子の分離検討は将来の課題とし、ここでは、ポンチ側素板表面あらしへの影響因子として、ダイス接触面圧 p およびしごき率 R_e をとり、三

図 12 精密表面創成条件の三次元表示

次元表示したものが図 12 である。 R_e が大きいほど、また p が大きいほど平滑化が達成されることがわかる。

5. 結 言

しごき加工による表面平滑化条件の検討を行った結果、次のような結論を得た。ダイス側素板面では、ダイス面との摩擦すべりによって表面が創成されるが、低粘度油潤滑適用時には焼付きによる表面むしれが生じ、高粘度油潤滑ではおおむね擦過傷面となり $R_a \approx 0.05 \mu\text{m}$ 程度の表面仕上げがえられる。これはダイス面に比べかなり劣るものである。ポンチ側素板面では、ポンチ面への転写によって表面が創成される。ポンチ面・素板面間を Dry (無潤滑) とししごき率を高めても、焼付きは全く発生せず、転写性は著しく高まる。ポンチ面 $R_a = 0.020 \mu\text{m}$ の場合には、しごき率を 20% 程度まで高めるとほぼ完全な転写面がえられる。本実験において可能な限り超精密仕上げを施したポンチ面 $R_a = 0.004 \mu\text{m}$ ではポンチ側 Dry (無潤滑) でしごき率を 50% 程度まで高めるとほぼ完全な転写面がえられる。結局、しごき加工に伴う工具面転写を利用する表面仕上げでは、しごき率を高めれば、工具面と同程度の表面仕上げが可能と結論される。

文 献

- (1) 河合・堂田, 塑性と加工, 25-285(1984), 861.
- (2) 水野・松原・木村, 機誌, 71-595(1968), 1037.
- (3) 小豆島, 機論, 44-377(1978), 332.
- (4) 村田・高橋, 軽金属, 33-1(1983), 16.
- (5) Knepp, J. E., Lubr. Eng. 40-9(1984), 554.
- (6) 河合・中村・宮本, 機論, 47-417, C(1981), 644.
- (7) 河合・ほか 3 名, 機論, 48-433, C(1982), 1473.
- (8) 河合・堂田・安田, 機論, 50-457, C(1984), 1664.
- (9) 河合・近藤・中村, 機論, 39-326(1973), 3181.
- (10) 河合・中村, 潤滑, 18-3(1973), 203.