

塑性加工における焼付き発生機構の研究*

(第3報, 焼付き発生に及ぼす潤滑油膜厚さの影響)

中村 保**, 松井 伯夫***

Seizure Initiation Mechanism in Cold Metalworking Processes (3rd Report, Effect of Oil Film Thickness on Seizure Initiation)

by Tamotsu NAKAMURA and Norio MATSUI

A critical condition for seizure initiation was examined using an extrusion-type friction testing machine. Paraffinic mineral oils with three grades of viscosity were tested with various oil film thicknesses, using a commercially pure aluminium as the workmetal. The seizure was always initiated near the die exit. The lower the viscosity of oil used and the thinner the applied oil film was, the earlier the critical punch stroke for seizure initiation was. The oil film thickness estimated theoretically in the previous report could not reasonably determine a critical value for the seizure initiation. Furthermore, the oil film thickness at the die exit was recalculated theoretically under the boundary condition of the trapped oil film thickness measured experimentally. As a result, it has been clarified that the critical oil film thickness for the seizure initiation was less than about 0.2 μm .

Key Words: Forming, Tribology, Seizure Initiation Mechanism, Critical Oil Film Thickness, Mineral Oil

1. 緒 言

常温で温度上昇の影響が無視できる潤滑条件下において、焼付き発生に対し潤滑油膜厚さが重要な影響を及ぼすという観点に着目して研究を進めている。前報⁽¹⁾では、粘性流体力学的解析を用いて、押出し形摩擦試験における工具・素材面間の油膜厚さがどの程度変化するかを理論的に検討した。その結果、潤滑油の粘度および塗布油膜厚さを調整することにより、ポンチ行程に伴うダイス出口油膜厚さ h_e の変化をある程度制御でき、油膜厚さ h_e を定量的に評価しうることがわかった。

本報では、素材として工業用純アルミニウム材料を用い、粘度等級の異なる3種類のパラフィン系鉱油の塗布油膜厚さを調整して押出し形摩擦試験を行った。そこで得られた焼付き発生条件を、前報の理論解析で求めたダイス出口油膜厚さ h_e によって整理し検討した結果、第1近似的には焼付き発生が臨界膜厚条件によって支配されていることが明らかになったので、ここに報告する。

2. 実験方法

本実験に用いた押出し形摩擦試験機⁽²⁾の主要部組立図を図1に示す。左右のコンテナ⑤、⑥と中心の平ダイス④によって囲まれる左右の型孔内(く形断面, 10×8 mm²)に、図2に示す初期形状の素材試験片①、②を装てんし、一對のポンチ③、④により同時に前方押し出しを行う。その際、平ダイス④に作用する面圧 p と摩擦せん断応力 τ_f の分布を同時に測定する。コンテナは割り型で、素材試験片の装てんおよび摩擦面の観察を容易に行うことができる構造となっている。

実験条件を表1に示す。測定体を兼ねる平ダイスは合金工具鋼SKD11焼入れ材($H_{RC} \approx 60$)で、供試摩擦面には1回の摩擦試験ごとにダイヤモンドペースト #3000 による超音波研磨を施し、表面あらさ $R_{max} \approx 0.3 \mu\text{m}$ 程度の鏡面に保った。試験用素材としては、厚さ10 mmの工業用純アルミニウムA1050熱間圧延終了材を用いた。図2に示すように、コンテナおよびテーパダイス形状に合わせて機械加工したのち、450°C、1hの焼なまし処理を施した。供試摩擦面は熱間圧延仕上げのまま、表面あらさ $R_{max} \approx 2 \mu\text{m}$ である。押し出し比は公称寸法で4であるが、型の弾性変形のため実測値は約3.7であった。押し出し速度は温度上昇の影響

* 昭和61年6月27日 北陸信越支部北陸地方(金沢)講演会において講演、原稿受付 昭和60年12月23日。

** 正員、静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北3-5-1)。

*** 准員、キャノン(株) (〒146 東京都太田区下丸子3-30-2)。

がほぼ無視できる程度の極低速約 0.01 mm/s とした。実験室温度は 17~25°C の範囲内であった。

供試潤滑剤としては、表 2 に示すような 3 種類の粘度等級のパラフィン系鉱油 VG 2, 26, 1000 を用いた。それらの動粘度 ν は 20°C, 常圧で $3.32 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ から $5.119 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ まで広範囲にわたっている。本実験では、塗布油膜厚さ h_a の広範囲における変更とその定量が重要な鍵となるため、以下のような 3 種の方法によって塗布油膜厚さ h_a を調整した。

(I) 素材供試摩擦面に鉱油を十分な量塗布したのち、試験片を垂直に立て、ほぼ安定な油膜が保たれるまで数分間放置したのち、試験に供した。この方法で、塗布油膜厚さ h_a は、VG 2 で約 15 μm , VG 26 で約 25 μm , VG 1000 で約 200 μm となった。

(II) 素材供試摩擦面に鉱油を十分塗布したのち、ガラス丸棒にて余分な油膜を繰返しこすり取る。残留油膜厚さは数回の繰返しにより、比較的再現性の良い安定した値となることが確認された。平均油膜厚さ h_a は精密てんびんで試験片質量の増分を測定して求めた。この方法では、いずれの粘度の鉱油の場合にも、 $h_a = 5 \mu\text{m}$ および 10 μm に制御することができた。

(III) 鉱油を溶剤のトルエンまたはベンジンにて、

約 200~2 000 倍に希釈したのち、その溶液を素材供試摩擦面に定量滴下し、溶剤のみ蒸発させる⁽⁹⁾。溶液は一様な膜を形成する程度の十分な厚さに塗布した。この方法で、塗布油膜厚さ h_a を 0.1, 0.3 μm および 1 μm に制御することが可能となった。

以上のように潤滑油を適用した場合のほか、比較のため、工具および素材の供試摩擦面をトルエンにて十分脱脂・乾燥した無潤滑条件についても試験した。なお、供試摩擦面以外には、二硫化モリブデン粉末をスプレー塗布し乾燥させた状態で潤滑した。

3. 焼付き発生に及ぼす塗布油膜厚さの影響

各潤滑条件における供試素材の焼付き発生部の代表的摩擦面性状を図 3 (a)~(d) に示す。いずれの場合にも焼付きはテーパダイス出口からベアリング部において発生している。前報⁽¹⁾ に示したように、ダイス出口に向かうほど油膜厚さが減少することが第 1 の原因と考えられる。さらに、前報の図 4 に示した面圧分布

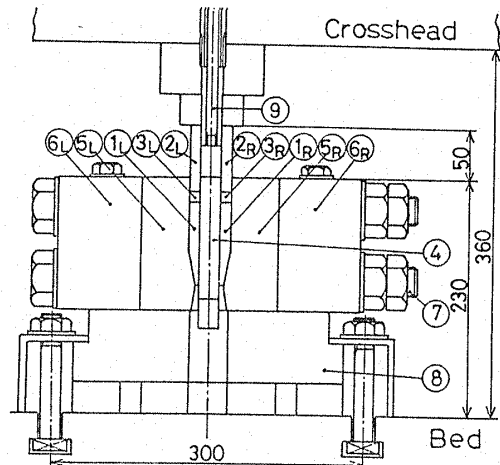
表 1 実験条件

	Material	Mechanical properties	Surface finish
Center flat die (Tool)	Tool steel alloy SKD 11 quenched and tempered	Rockwell hardness $H_{RC} \approx 60$	Ultrasonic polishing $R_{max} \approx 0.3 \mu\text{m}$
Workmetal	Commercially pure aluminium A 1050 P fully annealed	Tensile strength: 82 MPa Stress-Strain relation $\sigma = 124 \epsilon^{0.29}$	Hot rolled surface $R_{max} \approx 2 \mu\text{m}$
Extrusion ratio	4 (3.7)	Punch velocity	0.01 mm/s
Reduction of area	75 (73) %	Maximum punch stroke	30 mm
Taper die angle	14°	Room temperature	17~25 °C
Lubricational condition	Test surface	Paraffinic mineral oils in Table 2	
	Other surface	Molybdenum disulfide	

表 2 供試潤滑剤 (パラフィン系鉱油)

	VG 2	VG 26	VG 1000
Kinematic viscosity	20 °C 3.32×10^{-6}	70.9×10^{-6}	5119×10^{-6}
	40 °C 2.20	27.3	1007
	100 °C 0.97	4.9	51.1
Viscosity index	105	102	97
Specific gravity	0.813	0.864	0.907
Viscosity η_0 [Pa·s]	2.70×10^{-3}	6.05×10^{-2}	4.15
pressure B [Pa ⁻¹]	1.03×10^{-9}	2.36×10^{-9}	4.17×10^{-9}
relation* c [Pa ⁻¹]	2.27×10^{-9}	1.88×10^{-9}	1.44×10^{-9}
Sulfur wt %	0.00	0.15	0.95
Mean molecular weight	156	393	771
Ring analysis			
n-d-M	CA % 16.8	5.6	7.7
method	Cp % 32.9	26.8	26.7
	CN % 50.3	67.6	65.6
Applied oil film thickness [μm]			
Method I	≈ 15	≈ 25	≈ 200
II	5, 10	5, 10	5, 10
III	1	0.1, 1	0.1, 0.3, 1

* $\eta = \eta_0 \exp(Bp)$ or $\eta = \eta_0(1 + cp)^{1.6}$



①L, ①R Workmetal (Left, Right), ②L, ②R Punch (Left, Right), ③L, ③R Ram Block (Left, Right) ④ Center Flat Die (Measuring Device), ⑤L, ⑤R Container (Left, Right), ⑥L, ⑥R Container Holder (Left, Right), ⑦ Fastening Bolt, ⑧ Base Plate, ⑨ Pull Rod for the Center Flat Die,

図 1 押し形摩擦試験機主要部組立図

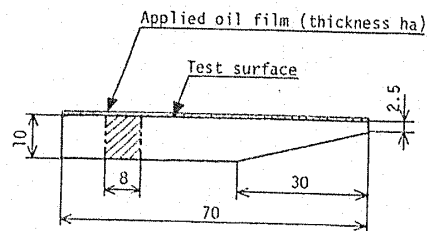


図 2 素材試験片および塗布潤滑油膜

においてダイス出口近傍で $p \approx 100 \sim 200$ MPa となり、第1報⁽²⁾に示した無潤滑状態の焼付き発生条件において、最も焼付きが発生しやすい面圧範囲に当たると考えられる。また、図3(a), (b)および(d)の場合には、焼付き状態は素材の幅方向全体に広がっているのに対し、図3(c)の場合には幅方向全体にわたらず一部に条こん状の焼付きが観察される。後者の焼付き状態はVG 1000の $h_a = 1 \mu\text{m}$ 以上の場合に現れることが確認された。油膜厚さの微妙な違いがこのような焼付き状態に影響を及ぼしているものと考えられる。

以上のようなダイス出口近傍における焼付き発生の有無を、素材摩擦面性状と工具面への凝着こん跡から評価し、ポンチ行程 H と塗布油膜厚さ h_a の関係を表す両対数グラフ上にプロットすると、図4(a)~(c)のようになる。図4において、○印は焼付きが全く観察されない面、●印は焼付き面を表す。◐印は遷移面で、工具面への顕著な凝着こん跡は観察されないが、素材摩擦面に条こんなどの変化が現れた場合を示し、焼付き直前の状態にあると考えられる⁽²⁾。いずれの潤滑油を用いた場合にも、ポンチ行程 H の進みに伴い摩擦面性状は焼付きの無い面から遷移面または焼付き面へと変化する。その際、焼付きが発生するときの限界のポンチ行程 H_{cr} は、塗布油膜厚さ h_a によって破線で示されるように変化することがわかる。

図4(a)低粘度油VG 2の場合には、 $h_a = 5 \mu\text{m}$ 以上では $H_{cr} \approx 3$ mm であるが、 $h_a \approx 1 \mu\text{m}$ 以下では $H_{cr} \approx 0.8$ mm となり、 $h_a = 0$ の線上に示した無潤滑状態の場合とほぼ一致している。図4(b)中粘度油VG 26

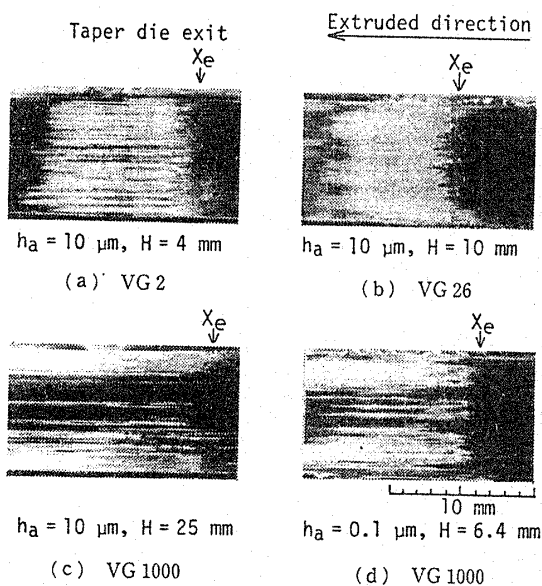


図3 素材供試摩擦面の焼付き状態

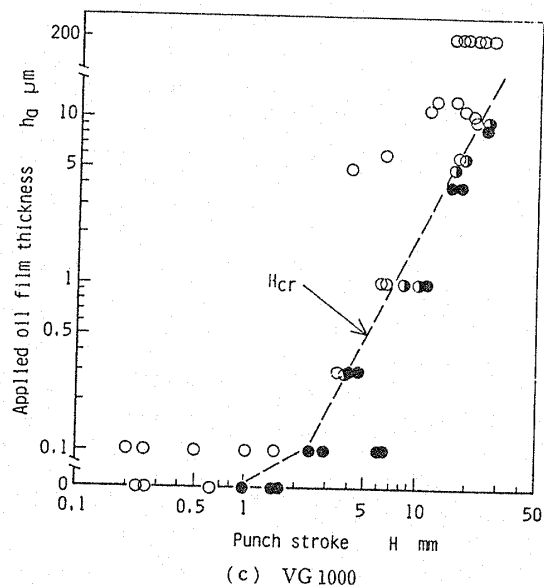
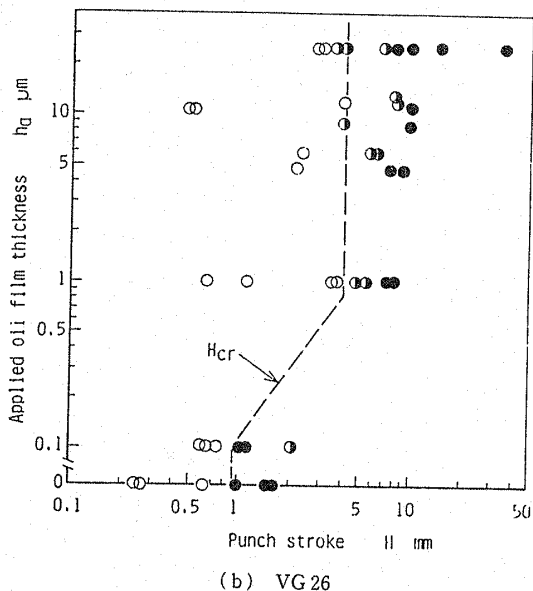
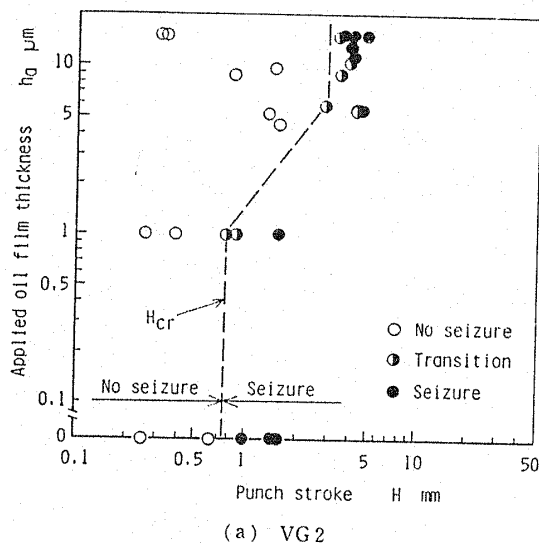


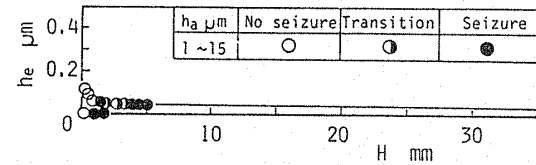
図4 焼付き発生に及ぼす塗布油膜厚さの影響

の場合には、 $h_a=1\mu\text{m}$ 以上で $H_{cr}\approx 4\text{mm}$ となるが、 $h_a\approx 0.1\mu\text{m}$ では $H_{cr}\approx 1\text{mm}$ となり、無潤滑の場合と一致する。さらに、図4(c)高粘度油 VG 1000 の場合には、 h_a の増加に伴い焼付き開始 (H_{cr}) が遅くなることがわかる。

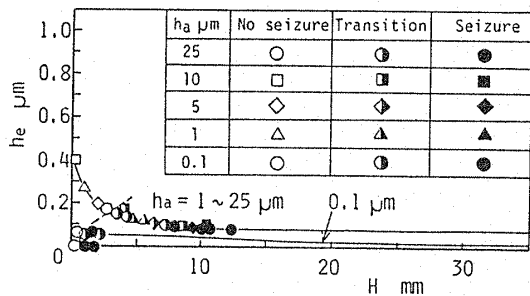
以上のように、概して潤滑油の粘度が低くなるほど、また塗布油膜厚さが少なくなるほど、焼付き開始のポンチ行程が早まり、終局的には無潤滑の場合の焼付き発生限界に一致することがわかった。このような焼付き発生条件は、ポンチ行程の進みに伴って工具・素材面間の油膜厚さがどの程度薄くなるかに強く影響されているものと考えられる。

4. 臨界膜厚条件に関する考察

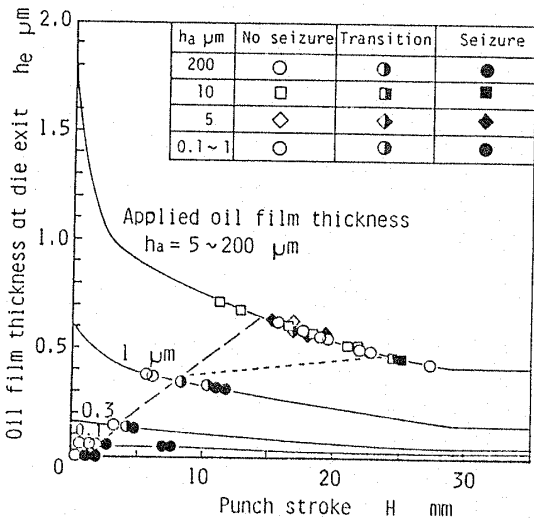
4.1 理論油膜厚さに基づく検討 前報⁽¹⁾で、粘



(a) VG 2



(b) VG 26



(c) VG 1000

図5 理論油膜厚さと焼付き発生限界 ($\eta = \eta_0 \exp(Bp)$)

性流体力学的解析により求めたダイス出口油膜厚さ h_e に基づいて、上述の図4に示した焼付き発生条件を検証してみる。図5(a)~(c)は、潤滑油の圧力-粘度関係 $\eta = \eta_0 \exp(Bp)$ を仮定して得られたダイス出口油膜厚さ h_e とポンチ行程 H の線図上に、図4の結果を整理して示したものである。図5(a)VG 2の場合には、 $h_a=1\mu\text{m}$ 以上のすべての場合が同一曲線上にプロットされているが、ポンチ行程初期から h_e は約 $0.1\mu\text{m}$ 以下になり、無潤滑の場合とほぼ焼付き開始が一致することを示している。図5(b)VG 26の場合には、 $h_a=1\mu\text{m}$ 以上の場合が同一曲線上にプロットされているが、 $h_e\approx 0.2\mu\text{m}$ 以下になると焼付きが発生することを示している。図5(c)VG 1000の場合には、 $h_a=5\mu\text{m}$ 以上の場合が同一曲線上にプロットされているが、破線および点線で示すように、 $h_a=10\mu\text{m}$ の場合の焼付き発生限界油膜厚さ h_{cr} は約 $0.5\mu\text{m}$ であるのに対し、 $h_a=5\mu\text{m}$ の場合には $h_{cr}\approx 0.65\mu\text{m}$ と高くなり逆転が生じている。さらに、 $h_a=1, 0.3, 0.1\mu\text{m}$ と小さくなるのに伴い、 h_{cr} は約 $0.35, 0.15, 0.05\mu\text{m}$ となり、焼付き発生限界を一定の臨界膜厚条件によって整理することは困難である。

図6は圧力-粘度関係 $\eta = \eta_0(1 + Cp)^{1.6}$ を仮定した場合の理論油膜厚さ h_e によって整理した結果を示す。塗布油膜厚さ $h_a=5\mu\text{m}$ と $10\mu\text{m}$ の場合における限界油膜厚さの逆転の差は図5(c)の場合より小さくなっているが、やはり一定の臨界膜厚条件を適用することは困難である。

4.2 素材充満時の閉じ込め油膜厚さの実測 前報⁽¹⁾で示したように、素材充満時の閉じ込め油膜厚さ h_0 によって、その後のポンチ行程における油膜厚さのレベルが大きく左右されることが知られた。そこで、この閉じ込め油膜厚さの実測を試みた。素材の供試摩

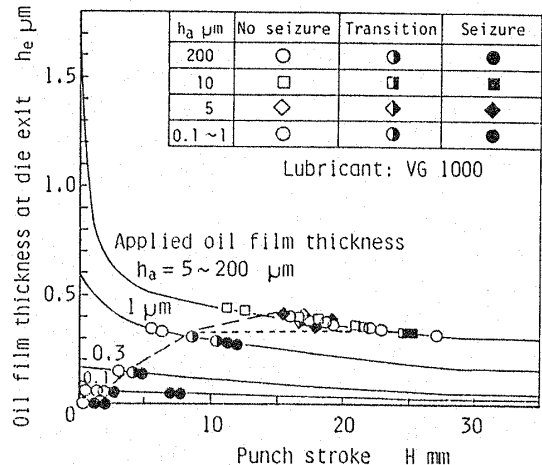


図6 理論油膜厚さと焼付き発生限界 ($\eta = \eta_0(1 + Cp)^{1.6}$)

擦面に潤滑油を定量塗布したのち、素材が型孔内に充満するまで加圧した。表面あらさ計を用いて、型孔内より取り出した素材摩擦面の断面曲線を約 10 mm 間隔で幅方向に測定した。その結果の一例を図 7 に示す。幅方向両端部近傍の断面曲線は記録されていないが、ほぼ工具面と同程度に平滑な面となり、幅方向の潤滑油の閉じ込めがほぼ完了していることが確認された。いずれの断面曲線にも大きなうねりが認められるが、潤滑油の巨視的閉じ込めによるくぼみ形状ではなく、工具面のうねりあるいは素材の弾性回復によるものと考えられる。

素材の準微視的凹凸が工具面によって平坦化され、潤滑油は準微視的凹部(マイクロプール)に閉じ込められた状態となっている。このマイクロプールの大きさは塗布油膜厚さ h_a の減少に伴って小さくなっている。これら断面曲線のマイクロプール部の面積を実測することにより、平均閉じ込め油膜厚さ h_o を求めた。その油膜厚さ h_o 分布の一例を図 8 に示す。ポンチ側の端末近傍 ($X = -1.35$) では $h_o = 0$ となり、ポンチ側への潤滑油の流れはほぼ完全に抑制されていることがわかる。テーパダイス部では、 h_o はテーパ入口角で減少し、出口に向かって増加する傾向を示すが、全体の平均値 \bar{h}_o は $0.69 \mu\text{m}$ となり、コンテナ部の値とほぼ一致している。

以上のように実測された閉じ込め油膜厚さ h_o を塗布油膜厚さ h_a に対して示すと、図 9 のようになる。前報⁽¹⁾の理論値と比較して、実測値はほぼ半分以下の値となっている。理論計算では工具面と素材初期表面が完全に平行かつ平滑な平面で接近すると仮定したが、実際には両表面のうねりや表面あらさのため、接触が局部的に開始し、準微視的閉じ込めが生じたものと考

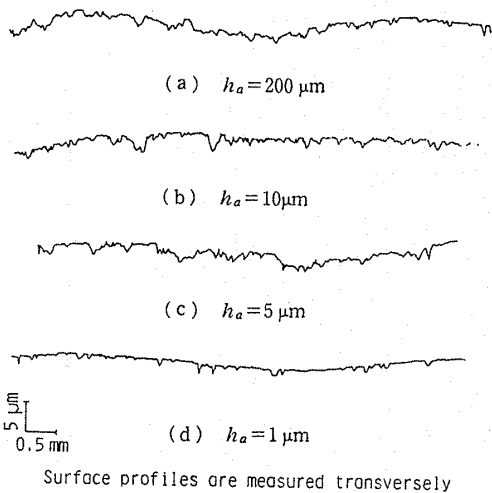


図 7 素材充満時の摩擦面の断面曲線の一例 (VG 1000)

えられる。

4.3 焼付き発生の限界油膜厚さ 潤滑油膜の形成が準微視的閉じ込め作用によることが確認されたが、その平均油膜厚さの変化を前報⁽¹⁾と同様に粘性流体力学的に解析できるものと仮定し、図 9 の実測値 h_o を初期油膜厚さとして、ポンチ行程 H に伴うダイス出口油膜厚さ h_e の変化を再計算した。その結果を図 10 および図 11 の実線によって示す。油膜厚さ h_e が薄いため、素材の表面積拡大による油膜厚さ h_e の減少が支配的となり、仮定した圧力-粘度関係の差異にもかかわらず、図 10 と図 11 はほぼ同じ傾向を示すことがわかる。図 5 または図 6 と比較して、 $h_a = 5 \mu\text{m}$ 以上の曲線が、 $h_a = 10 \mu\text{m}$ 以上と $h_a = 5 \mu\text{m}$ に分離されている。そこで、図 5 および図 6 と同様の記号で焼付きの有無を再整理してみた。VG 1000 の場合、図 10 および図 11 に破線で示すように、両者の焼付き限界線はほぼ一致している。すなわち、塗布油膜厚さ $h_a = 5 \mu\text{m}$ 以上(閉じ込め油膜厚さ $h_o = 0.35 \mu\text{m}$ 以上)の場合に、焼付き発生の限界油膜厚さ h_{cr} は約 $0.2 \mu\text{m}$ となっている。また、初期閉じ込めの油膜厚さ h_o が約 $0.2 \mu\text{m}$ 以下では、VG 2 および VG 26 の場合の焼付

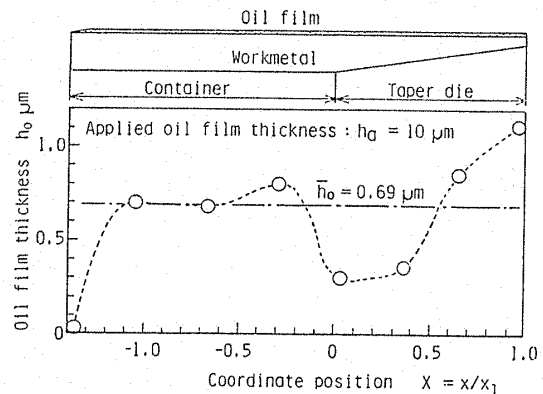


図 8 素材充満時の閉じ込め油膜厚さ分布の一例 (VG 1000)

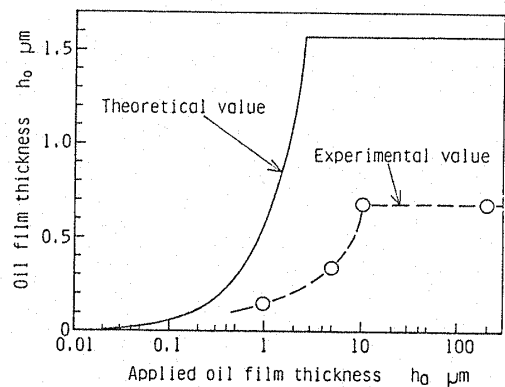
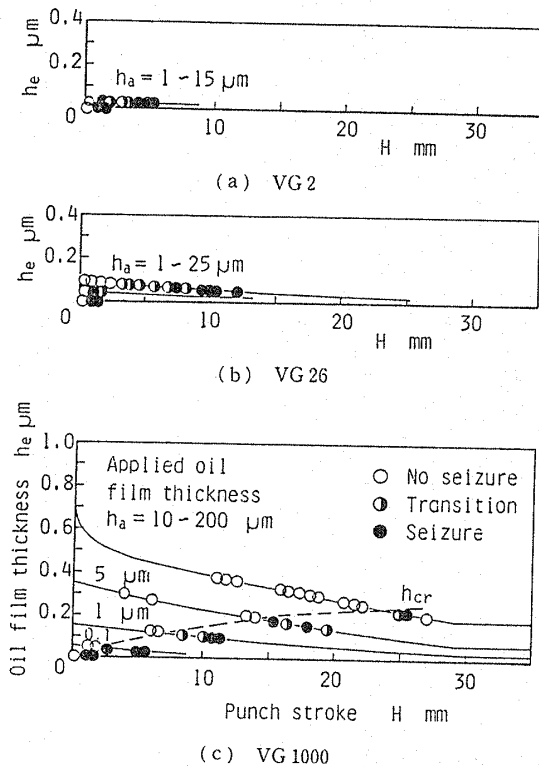


図 9 素材充満時の閉じ込め油膜厚さの比較 (VG 1000)

図 10 焼付き発生に対する限界油膜厚さ ($\eta = \eta_0 \exp(Bp)$)

き限界とほぼ一致することがわかる。

ポンチ行程に伴う素材摩擦面の変位を実測し、図 10(c)あるいは図 11 の結果を素材の相対すべり量 S によって整理しなおすと、図 12 のようになる。 $h_a = 1 \mu\text{m}$ 以下 ($h_0 = 0.2 \mu\text{m}$ 以下) の場合の焼付き発生限界の相対すべり量 S_{cr} は約 5~24 mm までの広範囲に変化している。したがって、第 1 近似的には焼付き発生に対する臨界膜厚条件が成り立つが、限界油膜厚さ $h_{cr} \approx 0.2 \mu\text{m}$ 以下では、境界潤滑膜の破断強度と補修能力、素材と工具の凝着性または表面あかさなどの他の要因によっても焼付き発生限界がかなり左右されるものと考えられる。この点については今後さらに検討を進めたい。

5. 結 言

焼付き発生に及ぼす潤滑油膜厚さの影響を解明するため、押出し形摩擦試験機を用いて、工業用純アルミニウム材料の試験片に粘度等級の異なる 3 種類のパラフィン系鉱油を定量塗布して、焼付き発生条件を調べた。さらに、その結果をダイス出口油膜厚さ h_e によって整理した結果、つぎのような結論が得られた。

(1) 潤滑油の粘度および塗布油膜厚さを変更しても、焼付きは必ずダイス出口近傍から発生する。これは、ダイス出口近傍において、油膜厚さが最も薄くな

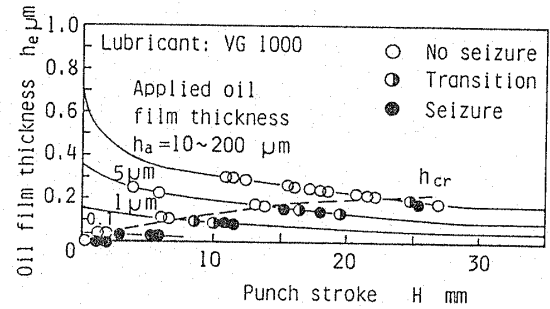
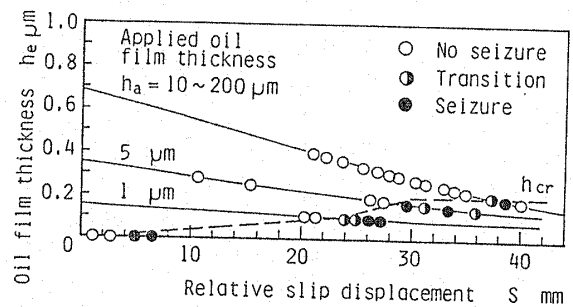
図 11 焼付き発生に対する限界油膜厚さ ($\eta = \eta_0(1 + Cp)^{1.6}$)

図 12 焼付き発生限界に及ぼす相対すべり量の影響

り、そのうえ接触面圧 p が焼付きの最も生じ易い範囲 $p = 100 \sim 200 \text{ MPa}$ に当たるためであると考えられた。

(2) ダイス出口近傍の焼付き発生の有無をポンチ行程 H と塗布油膜厚さ h_a のグラフ上にプロットした結果、潤滑油粘度が高いほど、また h_a が大きいほど焼付き開始のポンチ行程 H_{cr} が遅くなる。この焼付き発生条件をダイス出口の理論油膜厚さ h_e によって整理したが、焼付き発生の限界油膜厚さの合理的決定は困難であった。

(3) 素材充滿時における摩擦面の断面曲線を測定した結果、潤滑油の巨視的くぼみへの閉じ込みは認められず、準微視的閉じ込み(マイクロプール)によって油膜が形成されていることが確認された。その平均油膜厚さ h_0 を実測した結果、前報の理論計算で求めた閉じ込み油膜厚さの約半分以下の値となった。

(4) 閉じ込み油膜厚さ h_0 の実測値を初期条件として、ダイス出口油膜厚さ h_e を再計算し、その値に基づいて焼付き発生条件を再整理した。その結果、仮定した圧力-粘度関係の違いにもかかわらず、ほぼ同一の焼付き発生限界線が得られた。焼付き発生の限界油膜厚さは第 1 近似的には $h_{cr} \approx 0.2 \mu\text{m}$ となったが、これ以下の初期閉じ込み油膜厚さ h_0 からすべりが生ずる場合には、その値に応じて限界の油膜厚さ h_{cr} あるいは限界の相対すべり量 S_{cr} が変化することが明らかになった。

文 献

(1) 中村・松井, 本論文集 3324 ページ.

(2) 中村・ほか2名, 機論, 52-473, C (昭61), 163.

(3) 小坂田, 第33回塑性加工連合講演会講演論文集, (昭57-11), 303.

討 論

〔質問〕 島 進 (京都大学工学部)

(1) 閉じ込め油膜厚さ h_0 の実測値は VG1000 のものしか示されていないが, 粘度の低い VG2, VG26 の場合も, 図9のようになるか. 定量的にはいかがか. ご教示願いたい.

(2) ダイス出口油膜厚さ h_e は, h_0 を用いて計算をしておられるが, h_e を実験的に求めることはできないか (h_0 のように).

〔回答〕 (1) VG26 の場合, $h_a=1\sim 25\ \mu\text{m}$ では, 図10(b)に示されるように, h_0 の実測値は約 $0.1\ \mu\text{m}$ 程度になることが確認されている. しかし, 図7(d)の断面曲線からも推測されるように, $0.1\ \mu\text{m}$ 以

下の油膜厚さを断面曲線から推定すると, かなり誤差が大きくなり, 実測が困難になる. そこで, VG26 および VG2 については, 図9のような関係が得られるかどうかについて確認できていない現状である.

(2) ご指摘のように, h_e を実測できれば直接的でよいが, $h_e=0.1\ \mu\text{m}$ 程度の膜厚さの場合, ダイス出口近傍では焼付きが発生し, それに伴う表面あれが生じるので, 限界膜厚さ以下の油膜さを実測することはかなり困難になると思われる. そこで, 本研究では, やむを得ず計算によって推定した値を用いることとした.