鋼のコールドハビング用潤滑剤と各種鋼の変形抵抗について*

多賀谷 正義** 田村 今男***

Masayoshi Tagaya and Imao Tamura : On the Lubricants and the Formability of Steels for Cold-Hubbing. A method for producing steel-dies by cold-hubbing has been recently developed. In this method, some important problems remain unsolved on lubricants and tools, because steels have a high resistance to forming. In this report, the results of investigation on the effects of coatings and lubricants are described and also the results on the hubbing depths are compared and discussed for several steels, using a hardened W-Cr tool steel and a sintered carbide alloy as the hub materials. The lubricating properties were shown by the frictional force per unit contact area in the steady state of hubbing operation. Manganese phosphate was the most excellent as coating on the work steel. Molybdenum disulphide, stearate of divalent metals and wax such as stearyl-alcohol were effective as the lubricants by co-operating with suitable coatings. The resistance to forming in plain carbon steels increased linearly with the carbon content, but in alloy steels it was higher than in plain carbon steels of the same carbon content. The commercially pure iron made by L.D. converter method had very low resistance to forming, and this material is to be noticed as the excellent cold-forming material. Even the high-resistance materials to forming, such as tool steels in annealed state, could be hubbed more than 40 mm in depth in one stroke. In such a case, however, the hub materials that can endure the pressure not less than 450 kg/mm² must be used.

(Received July 7, 1962)

I. 緒 言

コールドハビング (Cold Hubbing) によつて、各種の金型を製作する方法が盛んに用いられるようになってきた。

** 大阪大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka University, Osaka)

従来のごとき彫刻法では高価であり、長時間を要し需要に応じきれないためである。しかし鋼の変形抵抗が大きいた

*** 大阪大学産業科学研究所 (The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Osaka)

* 1961 年 4 月および 1962 年 4 月本会東京大会に発表

めに、すべての型材についてハビングを行なうことは現在なお困難で、軟鋼が主として用いられている。そのため用途が限定され、プラスチックやゴム、ガラスなどの成形用型を作っているにすぎない。この場合においても、どのような鋼が最も適しているかを知らなければならないと同時に、変形抵抗の大きい特殊工具鋼、ダイス鋼の金属成形用型もハビングで簡単に製作出来れば型に関する多くの問題を解決することが出来る。

そのためには、このような極圧に耐える工具の強度と潤滑剤が最も大きな要因であるという見地から種々な潤滑剤の潤滑作用について研究すると同時に、種々な鋼材を選んで、どの程度加工出来るものかを検討し、工具についても簡単な考察を行なった。ハビングばかりでなく、鋼の冷間塑性成型法は多くの長所をもち、現在注目をあびている加工法であるが、これらのすべての加工法に対しても何らかの示唆を与えるものと考ええる。

II. 実験方法

ブランク材(被加工材)としては Table 1 に示す鋼材を完全焼なましして用いたが、潤滑剤の研究には主として酸素上吹転炉によって溶製された工業用純鉄を用いた。形状は直径 47 mm、長さ 75 mm の円柱で、ホルダー・リングとの接触面(側面)にテーパをつけず、またいかなる“ぬすみ”も作らなかつた。実際作業においてはテーパとぬすみを適当につけるのであるが、これらは実験条件を複雑にし、特にぬすみをつけることは、潤滑剤を研究する目的には潤滑面積を少なくし、あるいは材料の全体的な流動を少なくするもので、ふさわしくない。もちろんテーパやぬすみをつけることにより、ハビングは非常に容易にな

よつて最初の 20 t を予備荷重とし、その後の圧力-圧入深さ曲線を求めた。この際ラムの移動距離を測定したが、体

Fig. 1 Dimensions of hub used.

積不変として計算した実際の圧入深さで示した。本実験の場合実際の圧入深さはラム移動距離の 1.39 倍であつた。圧入速度は 0.01 mm/sec で最高荷重は SKS 3 ハブの場合 245 kg/mm²、超硬合金の場合 450 kg/mm² とした。

III. 潤滑皮膜

潤滑皮膜は潤滑剤の補助作用をすると同時に焼付防止に効果があり、鋼の冷間加工には必須のものである。従来伸線などでは磷酸塩皮膜、とくに磷酸亜鉛系皮膜が多く用いられ、またアルカリ処理、石灰付けなどは古くから用いられ銅、鉛、錫などの皮膜も材質に応じて使用されている^{(1)~(5)}。

ブランク材として L.D. 法によって溶製された工業用純鉄を用い、種々な潤滑皮膜を被覆して、その上に潤滑剤としてステアリン酸鉛を塗布した場合、圧力-圧入深曲線は Fig. 2 および Fig. 3 のようになる。曲線は三つの段階から成っており、大略 120~130 kg/mm で定常圧入段階⁽⁶⁾に入っている。潤滑作用がすぐれているほどこの段階が長く、しかも傾斜がゆるやかで圧力上昇が少ない。

Table 1 Chemical composition and hardness of steels used.

Steel	Chemical composition (%)						Hardness (Full annealed state) (H _B)
	C	Si	Mn	P	S	others	
*L.D.	0.022	Tr	0.25	0.008	0.010	Cu 0.08	78
CH ₁	0.08	0.318	0.523	0.014	0.018	Cu 0.124	97
S 15 CK	0.14	0.29	0.50	0.012	0.023	Ni 0.05, Cr 0.06	116
S 30 C	0.34	0.25	0.62	0.017	0.024	—	140
S 50 C	0.46	0.28	0.67	0.011	0.010	—	146
SNC 21	0.15	0.29	0.50	0.019	0.009	Ni 2.13, Cr 0.13	167
SK 5	0.82	0.22	0.40	0.014	0.007	—	174
SKD 5	0.31	0.22	0.35	0.019	0.004	Cr 2.55, W 9.50, V 0.42	187
SKS 3	0.90	0.25	0.95	0.023	0.003	Cr 0.75, W 0.58	202

* A steel made by L. D. converter.

る。それ故本実験の場合、テーパやぬすみをつけた場合よりも苛酷な条件で実験したわけである。Fig. 1 にハブの形状を示す。直径 25 mm で 1/50 のテーパをつけてある。このテーパは圧入後のハブの抜き取りを容易にするためのもので、これも実験条件を複雑にするわけであるが、実験遂行上やむをえないもので、最低限のテーパとした。ハブの材質としては SKS 3 の焼入れ材(RC 62)と超硬合金の 2 種を用いた。ブランク材とハブの直径比は 47:25 で減面率は約 25% である。

圧入方法は Sack und Kiesselbach 製 2500 t プレスに

これらの図からわかるように、磷酸塩皮膜の秀れていることは明瞭であるが、磷酸マンガン系皮膜がとくにすぐれ

- (1) W. Leng, K. H. Treptow : Stahl u. Eisen, **76** (1956), 1107.
- (2) W. Leng, K. H. Treptow : Stahl u. Eisen, **72** (1952), 1207.
- (3) K. H. Treptow : Stahl u. Eisen, **73** (1953), 666.
- (4) Fritz Schwier : Stahl u. Eisen, **73** (1953), 925.
- (5) E. C. Tompson, J. B. Carroll, E. Bevit : J. Iron Steel Inst., **173** (1953), 36.
- (6) 久能木 : 日本機械学会論文集, **22** (1956), No. 118, 418, 424, 437.

ていることは注目すべきことである。磷酸亜鉛系皮膜にステアリン酸亜鉛の潤滑剤を用いた場合、亜鉛の相互作用に

無いときは焼付が著しく固体皮膜があつてはじめてすぐれた性能を発揮する。テフロン、ナイロンを被覆したものは引吊をおこす。なおこれらの場合は、下地皮膜を使用しなかつた。

Fig. 2 Comparison of various phosphate as coatings.

Fig. 3 Comparison of various coatings.

よつてか潤滑作用が少し改善されるが顕著ではなかつた。

IV. 潤滑剤

このような高圧下の潤滑には主として固体潤滑剤が使用される(1)~(5)(7)(8)。本研究においては、液体、固体、有機、無機のきわめて多くの潤滑剤について実験した。いま、潤滑皮膜としての磷酸亜鉛系皮膜を施した場合について代表的なものを示すと、Fig. 4は二硫化モリブデン、コロイダルグラファイト、テフロン被覆の場合を示す。二硫化モリブデンの秀れていることが明瞭に現われている。二硫化モリブデンの中でもその粒の細かさなどによつて異なり、モリコートの場合ペースト状のGが最もすぐれ、粒の細かいマイクロファインはよくない。このように二硫化モリブデンは潤滑性がすぐれているが、潤滑皮膜の

Fig. 4 Comparison of various lubricants (1), teffron, graphite and molybdenum disulphide.

Fig. 5は金属石鹼の場合で、鉛、亜鉛などの2価金属塩がすぐれていることを示している。Fig. 6はその他の種々の潤滑剤について示しているが、ステアリンアルコールのような蠟がすぐれていることは注目すべきことである。なおFig. 6には下地皮膜として最もすぐれている磷酸マンガン系皮膜を施して、潤滑剤としてモリコートGとステアリン酸鉛を用いた場合の曲線も付記してある。これらは本実験

Fig. 5 Comparison of various lubricants (2), various stearate of metals.

によつて得られた最もよい潤滑条件で実験したものである。245 kg/mm²までの圧力で60 mm以上の圧入が1回でできることは特筆すべきことである。

Fig. 6 Comparison of various lubricants (3), several lubricants and the most excellent lubrications in this work.

以上の実験から潤滑剤としては二硫化モリブデン2価の金属石鹼、ステアリンアルコールのような蠟がすぐれていることがわかる。しかし潤滑剤の効果は圧力-圧入深曲線の第1段階ではほとんど認めることができず、第2段階の定常圧入段階ではじめて大きな効果の相違が現われてくる。第1段階はほとんど鋼の変形抵抗のみに関係するようである。それ故10 mm程度の圧入のときはほとんど潤滑剤の効用はわからない。

(7) A. J. Stock: Metal Progr., 76 (1959), No. 3, 147 A (ダイジェスト)。

(8) J. Gaensheimer: Metal Progr., 77 (1960), No. 6, 200 (ダイジェスト), および Preprint of the Seminar on Friction, Lubrication and Wear, Lucerne, Switzerland, Sept. 18, 1959.

V. 各種鋼材の変形抵抗

以上は主に L.D. 鋼についての実験であるが、鋼種が変り、それに応じて変形抵抗が大となると定常圧入段階は高い圧力のところでおこる。SKS 3 のハブでは 300 kg/mm^2 以上の圧力では破壊の危険があるので 250 kg/mm^2 以下で実験した。Fig. 7 は燐酸マンガン系皮膜とステアリン酸鉛を潤滑剤として用いたときの圧力-圧入深曲線である。ステアリン酸亜鉛を潤滑剤にした場合も同様である。

曲線は三つの段階から成り立ち、弾性変形、降伏、塑性変形、加工硬化をおこすに従って圧力が急に増大する。これが第 1 段階である。そしてある程度圧入されると定常圧入段階に達する。これが第 2 段階の比較的勾配のゆるやか

Fig. 7 Work resistances for several steels using the hub of hardened SKS 3 tool steel.

な段階である。定常圧入に入ると、摩擦の増加がなければ、圧力の上昇なしに圧入されるはずであるが、実際は摩擦の増加のためほとんど直線的に上昇する。潤滑膜が切れて金属が相互に直接接触すると摩擦が著しく大となり、圧力が急に増大する。これが第 3 段階で、焼付きもこの段階でおこる。それ故、これらの素材の変形抵抗は第 1 段階から定常圧入に入るときの臨界の圧力で示すことができる。

Fig. 8 Work resistances for several steels using the hub of sintered carbide alloy.

Fig. 7 によると、L.D. 鋼、CH₁、S 15 CK、SNC 21、S30C、S50C、SKD5、SK 5、SKS 3 の順に変形抵抗が大きくなっていることがわかる。しかし 245 kg/mm^2 までの圧力では L.D. 鋼、CH₁、S 15 CK のような変形抵抗の小さい軟鋼の

みしか定常圧入段階に達していない。

ここで L.D. 鋼は不純物が少なく純鉄に近いので変形抵抗がきわめて小さいことは、当然のことであるけれども特筆すべきことであり、この種の冷間塑性加工用鋼として注目すべきである。約 200 kg/mm^2 の圧力で 60 mm 以上の圧入を 1 回で成し遂げることができる。

超硬合金ハブを用いて 450 kg/mm^2 までの圧力をかけて実験した結果は Fig. 8 のようである。この図からわかるように変形抵抗の大きい鋼においては定常圧入に入る圧力が高くなるが、定常圧入段階における傾斜はほとんど同一で、平行している。しかし定常圧入段階が高い圧力レベルになると幾分傾斜が急になるようである。すなわち定常圧入段階では主として潤滑効果が大きな役割を果しているようである。従って潤滑効果をよくし、高圧に耐える工具を用いれば工具鋼、合金工具鋼のような硬い、変形抵抗の大きい材料でも完全にヘビングすることが可能であり、1 回で 40 mm 以上の圧入を成し遂げることができる。

VI. 考察および結果の総括

第 1 段階から定常圧入段階に入るときの臨界の圧力、すなわち変形抵抗 U_p は普通引張り強さの 3~5 倍といわれている⁽⁹⁾。この U_p の値を上述の曲線から求めることは正確を期し難いが、これを読み取って炭素量との関係として図示すると Fig. 9 のようになる。炭素鋼では大略炭素量に従って直線的に上昇する。合金鋼ではこの直線で示されるよりも高く現われる。とくにダイス鋼において著しい。ブリネル硬度との関係をとれば Fig. 10 のようになる。炭素鋼では一つの曲線の上に乗る、合金鋼ではその曲線の下側に現われる。すなわち鋼材の変形抵抗は炭

Fig. 9 Relationship of forming resistance versus carbon content of various steels at annealed state.

素量とともに増大し、合金元素が存在するとさらに変形抵抗を増す。

前述のように摩擦面に摩擦がないものと考え、定常圧入段階に入れば、圧力の増加なしに圧入されてゆくはず

(9) 藤岡：塑性と加工，1(1960)，No. 1, 3.

である。しかし実際にはほとんど直線的に圧力が増加している。そして潤滑剤の相違によつてこの段階における傾斜

Fig. 10 Relationship of forming resistance versus Brinell hardness of various steels at annealed state.

が違っている。これは明らかに圧入進行による摩擦面の増大と潤滑効果の相違を示すものである。すぐれた潤滑剤を用いれば定常圧入段階における傾斜が小さく、この段階が長く続き、焼付きの段階に達し難い、そして結果的には小さい圧力で深く圧入できるわけである。

Fig. 11 The contact area during hubbing.

$$S_h = \pi d h + \pi D h'$$

$$h = D^2 h' / (D^2 - d^2)$$

となる。定常圧入段階において荷重が $4p$ kg 上昇したとき $4h$ mm だけ圧入されたものとする。そのときの単位面積当りの摩擦力の上昇を η kg/mm² とすると、

$$\eta = \Delta P / \pi \{ d + (D^2 - d^2) / D \} \cdot \Delta h$$

で示される。 η の値が小さいほど潤滑性能がよい。

η の値について、上記の L.D. 鋼での実験結果をまとめると、定常圧入段階において潤滑皮膜に対しては Table 2 のようであり、潤滑剤については Table 3 のようである。これらの表には 150 kg/mm² のときの圧入深さ（定常圧入段階に入つた初期）および SKS3 ハブによる最高圧力 245 kg/mm² のときの最大圧入深さをも示している。245 kg/mm² においては、潤滑剤の種類によつてはすでに第 3 段階に入り、焼付きをおこしているものもある。

これらの表からわかるように、潤滑皮膜としてはマンガン系、鉄系、亜鉛系の磷酸塩皮膜、硫化鉄、鉛、銅、石灰、

Table 2 Comparison of lubricating properties for various coatings.

Coatings.	Depth at 150 kg/mm ² (mm)	η (kg/mm ²)	Depth at 245 kg/mm ² (mm)
Zn-phosphate (A)	16	7.7	39.2
Mn-phosphate	16	4.7	63.5
Fe-phosphate	19	7.1	48.2
Zn-phosphate (B)	13	15.5	26.2
Zn-phosphate (C)	16	7.8	35.4
Copper	15	11.6	32.5
Iron-sulphide	16	10.8	34.0
Lead	8	9.4	34.0
Alkali dip	12	12.0	30.3
Lime	17	16.3	31.4

Pb-stearate was always used as the lubricant.

L.D. converter steel was used as the work material.

Table 3 Comparison of lubricating properties for various lubricants.

Lubricants	Depth at 150 kg/mm ² (mm)	η (kg/mm ²)	Depth at 245 kg/mm ² (mm)
Rape-seed oil	15	10.3	37.5
T.C.P.	13	11.6	30.1
Paraffin wax	13	11.3	29.7
Tallow wax	13	13.5	29.0
Stearilalcohol	15	8.6	40.1
Li-stearate	14	8.6	38.2
Na-stearate	13	9.9	33.4
Pb-stearate	15	8.6	39.2
Zn-stearate	14	7.7	44.1
Tefron	13	9.6	35.3
MoS ₂ (Molykote G)	14	5.7	48.4
MoS ₂ (Molykote Z)	12	7.7	39.9
PbO	12	11.6	29.2
Pb ₂ O ₃	14	10.1	31.7
Ba(OH) ₂	12	12.5	27.5
CaCO ₃	9	11.4	25.8
Talc	14	16.3	27.6
Waterglass	12	10.8	31.7
Colloidal graphite	12	9.0	35.1
*MoS ₂ (Molykote G)	16	4.3	65.2**
*Pb-stearate	16	4.7	63.5

Zn-phosphate was used as the coating.

L.D. converter steel was used as the work material.

* Mn-phosphate was used as the coating.

** The depth at 225 kg/mm².

アルカリの順に悪くなつており、磷酸マンガン系皮膜が格段とすぐれていることがわかる。潤滑剤ではモリコート G、ステアリン酸亜鉛、モリコート Z、ステアリンアルコール、ステアリン酸鉛などがすぐれている。しかして磷酸マンガン系皮膜を下地とし、これらのすぐれた潤滑剤を使用すれば最高の潤滑効果をうることができる。

ハビングの加工条件は圧力がきわめて高く、速度が遅い。そのため Stribeck の曲線から考えても、潤滑面において金属-金属接触をおこしやすく、潤滑は困難である。このような条件において潤滑効果をよくする潤滑剤としては、液体潤滑剤による動水圧的な潤滑 (Hydrodynamic Lubrication) では油膜強度が不十分で、どうしても固体潤滑剤にたよらなければならない。Gaensheimer⁽⁶⁾によれば、固体潤滑剤がすぐれた潤滑効果を示すためには、固体

(10) 小川、竹内：精密機械，14(1958)，No.12,669.

(11) 栗野、山川、伊藤：名古屋工技試験報告，5(1956)，No.9,7 および 6(1957)，No.5,9.

潤滑剤の剪断強度が小さくて、金属表面によくなじみ、金属表面をよく覆つて金属-金属接触を防ぎ、しかも剪断強度が小さくても潤滑の単位層は非常に強固で弾性に富み、金属表面の突起部などによつて、潤滑膜が破られることのないことが必要である。このような条件にあう固体潤滑剤としては2硫化モリブデンやグラファイトのような無機層状結晶化合物がすぐれ、たとえば2硫化モリブデンの場合、その結晶構造はS-Mo-S-S-Mo-Sというように層状に配列し、S-Moの結合は強固であるが、S-S結合は弱く、そのため結晶は少しの剪断応力によつても崩れるが、最後に残るS-Mo-S結合は非常に強固で、この単位結晶はよほどの大きな力がかからないかぎり崩壊することはない、強固な潤滑膜を形成する。しかも2硫化モリブデンは比重が大きく緻密で、金属に対してよくなじむ。それはSが金属表面に吸着しやすいためである。ワックス、金属石鹼なども固体潤滑剤として広く使用され、これらは金属表面に非常に強い吸着皮膜を作るためであると考えられている。

潤滑下地皮膜としての磷酸塩皮膜は、その表面の結晶構造が非常に緻密で、潤滑剤の潤滑皮膜形成を容易にすると同時にその潤滑皮膜の崩壊を防ぐといわれている。ハビングのような苛酷な条件では、潤滑剤のみではいかに強固な潤滑被膜でも崩壊され、どうしても磷酸塩の下地皮膜を必要とする。従来マンガン系および鉄系磷酸塩皮膜は摩擦による引つかきを減少するといわれており、亜鉛系は主として鋼の加工に使用されている。鋼の加工にも種々な方法があるから、ハビングには引つかきを減少するマンガン系がすぐれているようである。また潤滑剤としては上記の理由から2硫化モリブデン、2価の金属石鹼、蠟などのすぐれていることがうなずかれるが、詳細についてはいまだ考察する段階に到っていない。

VII. 結 言

鋼のコールドハビング用潤滑剤と、各種鋼材の変形抵抗について研究を行なつた結果、潤滑皮膜としては磷酸マンガン系皮膜が最もすぐれていることがわかつた。潤滑剤としては2硫化モリブデン、2価の金属石鹼、ステアリルアルコールのような蠟がすぐれている。これらの潤滑剤の潤滑性能を定常圧入段階における単位接触面積あたりの摩擦力をもつて量的に表示した。変形抵抗の大きい鋼材においても、定常圧入段階における傾斜は潤滑法が同一の場合には僅かに大きくなるのみではば一定の値を示し、潤滑剤の性能のみに関係する。しかし定常圧入に達するまでの浅い圧入のときには潤滑剤の効果はほとんど認められず、もつぱら鋼の変形抵抗のみに依存する。

変形抵抗は炭素量とともに直線的に上昇するが、合金鋼はこの直線よりも高く現われる。硬さとの関係をとると、炭素鋼は一つの曲線で示されるが、合金鋼はこの曲線の下に現われる。すなわち炭素量が多いほど変形抵抗は大きく、合金元素が多くなると一層大となる。

上記の最良の潤滑法を用いた場合、軟鋼では245kg/mm²の圧力で60mm以上の圧入が1回で可能であり、とくにL.D.鋼はきわめて変形抵抗少なく、成形が容易で冷間塑性加工用鋼材として注目すべきである。炭素工具鋼や合金工具鋼のような硬い材料でも一度に40mm以上のハビングが可能である。しかし450kg/mm²以上の圧力に耐えるハブを使用しなければならないので、今後工具材料の開発が望まれる。

最後に本研究に助力された松島康夫、山田淳司の両氏に感謝する。またプレスの使用およびその他の便宜を与えられた松下電器産業(株)中央研究所、材料を提供された日本鋼管(株)、(株)日本鉄工所、超硬合金ハブを提供された住友電気工業(株)、および潤滑剤を提供された三菱石油(株)、ミリオン化学(株)に深く感謝の意を表します。なお本研究は昭和36年度文部省科学試験研究費によつて行なつたものである。