

論 文

UDC 621.771.8.016.3 : 669.146.99 : 669.718.68

冷間圧延法によるアルミクラッド鋼の接着機構に関する研究*

前 田 光 明**・豊 島 清 三***

A Study on Bonding Mechanism of Aluminum Clad Steel
by Cold Rolling

Mitsuaki MAEDA and Seizo TESHIMA

Synopsis:

A number of studies on bonding mechanism of clad metals by cold rolling have been reported, but a definite conclusion of the bonding mechanism has not yet been recognized.

In cold clad practice, it can be thought that the factors affecting the bondability may be kind of metals, surface condition, thickness ratio of metals, temperature, relative slip, and so on.

Several factors affecting the bond shear strength of aluminum clad steel by cold rolling were examined. Further, the temperature of the bond during rolling was measured by I. C. thermo-couple. As the result, an average temperature of about 650°C in 0.05 sec was obtained.

From these facts it may be suggested that the bonding mechanism by cold rolling is mutual fusion of metals at contact part under high pressure and high deformation by frictional heat caused by relative slip of metals.

1. 結 言

金属および合金の鍛圧接着に関する研究^{1)~15)}は熱間、冷間ともに古くから数多く行なわれており工業的にもいろいろな分野で実用化されている。しかし接着の機構に関しては不明な点が多く、特に冷間圧延法による場合には、一致した研究結果はまだ報告されていない。

従来、接着強度、接着界面付近の組織と硬度、表面状態などを調べることによつて研究が進められてきた。また圧延時の母材とクラッド材の相対すべりが接着強度に大きな影響を及ぼすことから、接着の機構はまさつ熱による融着とする説¹⁶⁾もあつた。また圧接時の界面の温度測定結果はまだ報告されていないようである。

冷間圧延法による接着の場合、接着状態に影響を及ぼす因子としては金属の種類、表面状態、板厚比、温度、圧力、接着界面における相対すべりなど多くの因子が考えられる。

そこで本研究においては、冷間圧延による接着の機構を調べるために、冷間圧延によりアルミクラッド鋼を作つて種々の加工因子の接着強度に及ぼす影響を検討し、

更に熱電対によつて圧延中の接着界面における温度変化を測定した。以下にその結果を報告する。

2. 実 験 方 法

供試材には板厚 2.3 mm の低炭素鋼熱延板と、板厚 1 mm と 2 mm の軟質アルミニウム板と、板厚 2 mm の硬質アルミニウム板を使用した。供試材の化学成分を Table 1 に示す。

軟鋼板は長さ 110 mm、幅 48 mm、またアルミ板は長さ 300 mm、幅 48 mm に切断し、脱脂剤としてトリクロルエチレンを使用して、ワイヤブラッシングと化学研摩の二種類の前処理を施した。化学研摩液の組成を Table 2 に示す。

前処理を施した試料は、Fig. 1 に示すようにアルミ板を外側にして中に軟鋼板をはさみ、各圧下率にて 1 パスで圧延を行つた。

圧着したクラッド材より Fig. 2 に示すような試験片を作製して、接着面におけるせん断破壊応力を測定し、これを接着強度とした。また圧延時の圧延荷重の実測値より次式により平均圧延圧力を求めた。

* 昭和 48 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 49 年 9 月 25 日受付 (Received Sept. 25, 1974)

** 九州大学大学院 (現在(株)神戸製鋼所) (Ihodomitory, Kobe Steel, Ltd. 6-1, 2 chome, Nakajima, Takasago 676)

*** 九州大学工学部 工博 (Kyushu University)

Table 1. Chemical composition of materials (wt %).

Mild steel	C	Si	Mn	P	S	Cu
	0.09	0.01	0.38	0.011	0.019	0.04
Aluminium	Al	Si	Cu	Fe		
	99.5	0.30	0.02	0.18		

Table 2. Composition of chemical polishing reagents.

	H ₂ SO ₄	HNO ₃	H ₃ PO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄	H ₂ O
For aluminium	500(cc)	100(cc)	500(cc)	—	—
For mild steel	100(g)	250(g)	—	130(g)	1 000(g)

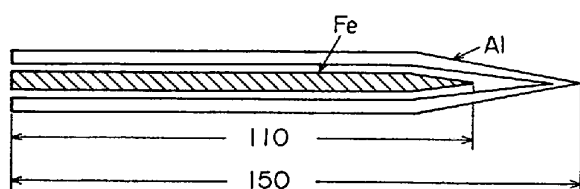


Fig. 1. Shape of metals combined before cold rolling.

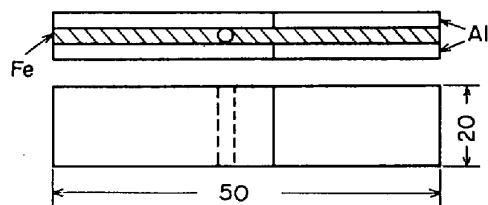


Fig. 2. Test piece to measure shear strength of the cladding.

$$\bar{p} = P/b \cdot L \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$L = \sqrt{R_0(\Delta h + 2C_0 P/b)}$$

$$C_0 = 1.08 \times 10^{-4}, b = 48(\text{mm}), R_0 = 80(\text{mm})$$

$\bar{p}$: 平均圧延圧力 (kg/mm²)

P : 圧延荷重 (kg)

b : 圧延材の板幅 (mm)

L : 接触弧長 (mm)

Δh : 圧下量 (mm)

R_0 : ロール半径 (mm)

この平均圧延圧力により TRINKS の曲線¹⁶⁾を用いて、最大圧延圧力 $P_{\max}$ を求めた。この場合のまさつ係数は 0.2 として計算を行なった。

圧延前後の各相の板厚を測定し、軟鋼板に対するアルミ板の圧下率比 S を求めた。

$$S = r_{\text{Al}}/r_{\text{Fe}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

S : 軟鋼板に対するアルミ板の圧下率比

$r_{\text{Al}}, r_{\text{Fe}}$: アルミ層および軟鋼層の圧下率

この圧下率比 S は、相対すべり量 d と式 (3) に示すような関係がある。

$$d = \frac{(C+1)(CS+1)(S-1)r}{\{1 - (C+1)r + CS\}[1 + \{C - (C+1)r\}S]} \quad \dots \dots \dots (3)$$

d : 相対すべり量

r : 総圧下率

C : 圧延前の板厚比 ($H_{\text{Al}}/H_{\text{Fe}}$)

式 (3) において、板厚比 C と総圧下率 r を一定にすると、相対すべり量 d は圧下率比 S の関数である。また板厚比 C と圧下率比 S を一定にすると、相対すべり量 d は総圧下率 r の関数である。従つて圧下率比 S と総圧下率 r とは相対すべり量 d のパラメーターとして使用できる。

接着界面の組織は、圧延のままの試料については圧延

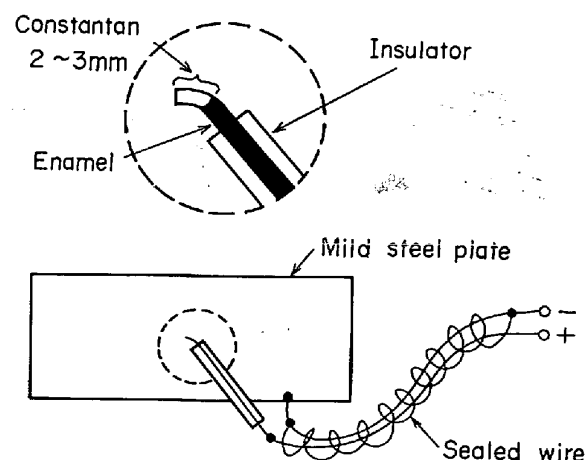


Fig. 3. Layout of Iron-Constantan thermocouple to measure the temperature Fe-Al interface in cold rolling.

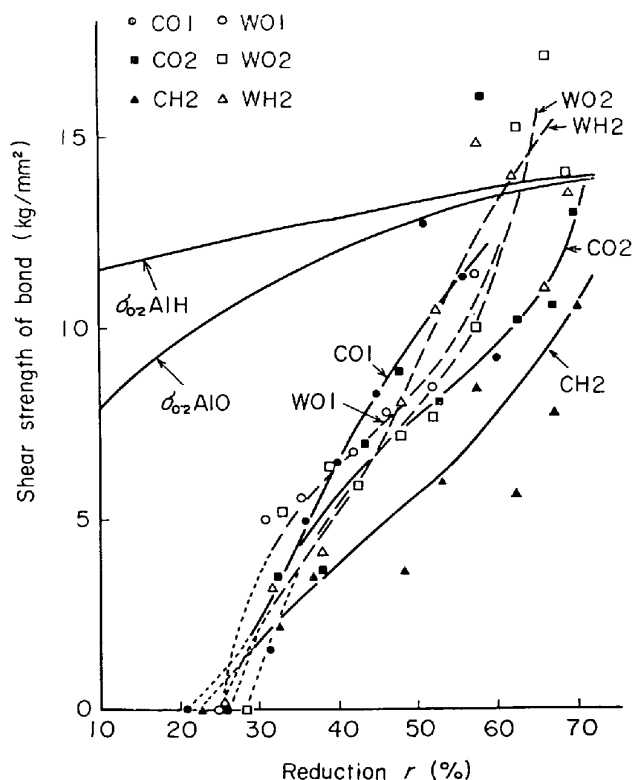
面に対し約 15° の断面を、また熱処理を施した試料については圧延面に対して垂直な断面を、5%Nital 液と 3%HF 溶液にて腐食後観察した。またこれらの試料に対して XMA 分析もあわせて行なった。

圧延の際の接着界面における温度変化を測定するために、 $0.2\text{mm}\phi$ のコンスタンタン線を Fig. 3 に示す如く設置し圧延中の熱起電力の変化をシンクロスコープにて測定した。

3. 実験結果と考察

Fig. 4 は、接着強度と圧下率の関係を示す。同図中の記号は、Cは化学研摩、Wはワイヤブラッシング、OとHはアルミの軟質材と硬質材、数字はアルミの最初の板厚をそれぞれ示している。また $\sigma_{0.2}$ は、圧延引張法（素材をあらかじめ各圧下率に圧延したものから引張試験片を作成して引張試験を行なった。）によつて求めたアルミの降伏応力である。

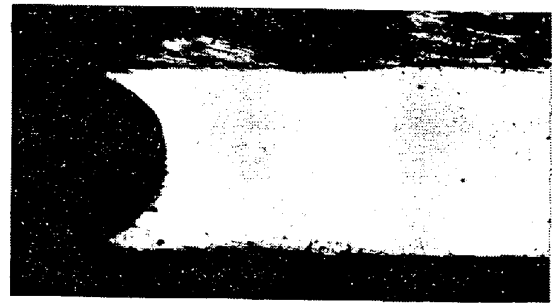
Fig. 4 において接着強度は、圧下率の増加とともに増加しており、CH2を除いて接着強度に著しい差はない。CH2の接着強度が他に比べて低いのは、おもに表面状



$\sigma_{0.2}ALH$: Yield stress of hard aluminum
 $\sigma_{0.2}ALO$: Yield stress of soft aluminum
 C: cleaned by chemical polishing
 W: cleaned by wire brushing, O: soft aluminum
 H: hard aluminum, 1, 2: thickness of Al sheet in mm

Fig. 4. Relation between shear strength and cold rolling reduction.

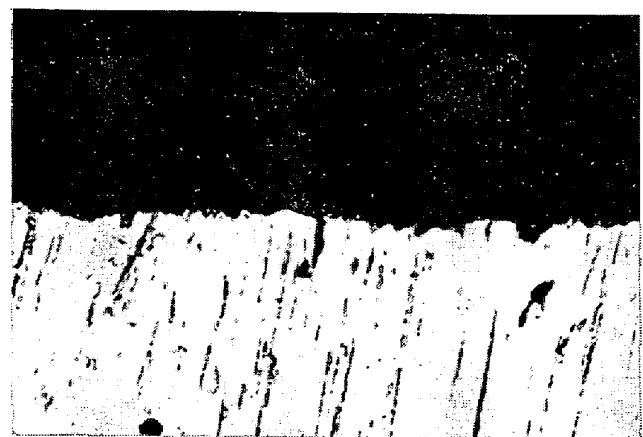
態の影響（すなわち、化学研摩後の水洗の際に水酸化物の膜が生じた）によるものと考えられる。圧下率が 50% 位になると接着強度はアルミのせん断強度に達し、それ以上になるとアルミの強度より高くなる傾向にある。接着強度がアルミの強度より高くなつたのは、Photo. 1 に示すごとく、せん断試験を行なった試験片には、接着部鉄表面にそつてアルミが付着しており、実際の破断面積



(a) $r=72\%$ $\times 25$



(b) $r=30\%$ $\times 500$



(c) $r=72\%$ $\times 500$

- (a) Macro view of sheared off test piece
 (b) Small Al fragments are seen on steel surface. (lower reduction)
 (c) Much more Al fragments are seen on steel surface. (higher reduction)

Photo. 1. Surface of bonded part after bond shear test.

が計算に使用した面積よりも大きくなったためである。この事は、接着強度がアルミのせん断強度よりも高いことを説明している。

Fig. 5 は接着強度と最大圧延圧力 $P_{\max}$ との関係を、また Fig. 6 は接着強度と圧下率比 S との関係を示す。Fig. 6 において、圧下率が低い場合には接着強度に極大

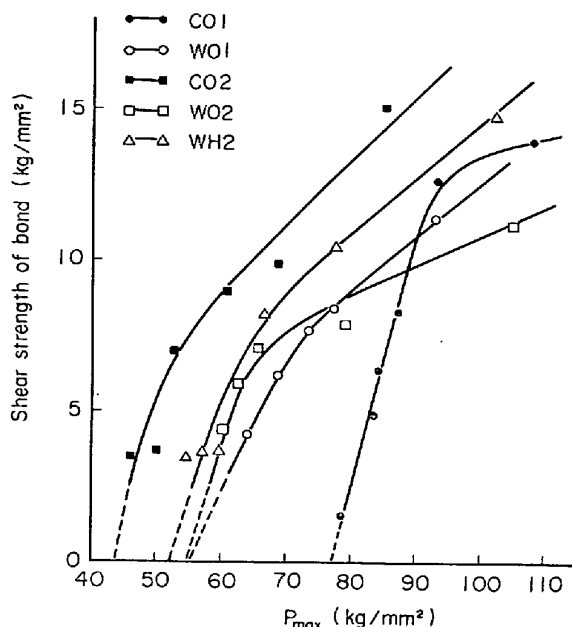


Fig. 5. Relation between shear strength and maximum rolling pressure for each cooking condition.

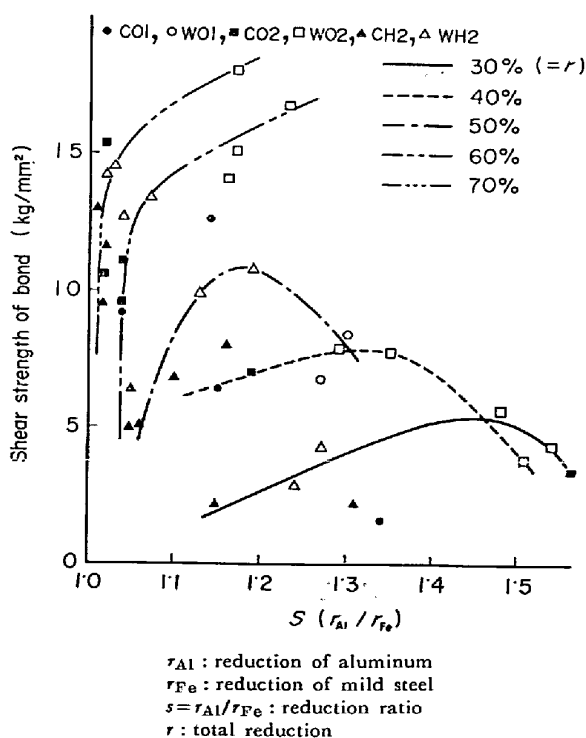


Fig. 6. Relation between shear strength and the reduction ratio of both metals.

値が現われている。これは相対すべりが、ある程度以上になるとまさつ熱が過大となり軟化を生じるためではないかと思われる。

Fig. 4, Fig. 5 および Fig. 6 より、最大圧延圧力と相対すべりは接着強度に影響を及ぼす重要な因子であり、表面処理方法、材質、板厚比などの条件としては、これらの因子を大きくするように選ばば良好な接着状が得られることがわかる。

Fig. 7 は、接着強度に対する相対すべり量 d と最大圧延圧力 $P_{\max}$ の積との関係をプロットした図である。この図において O 材の接着強度は、 $d \times P_{\max}$ の値が 22 以上となると一定になるが、これは O 材が H 材に比べて相対すべり量が大きく、したがってまさつ熱の影響によってアルミが軟化を生じるためと考えられる。 $d \times P_{\max}$ はまさつ熱に関係する量であり、この図から温度もまた接着強度に影響を及ぼす因子と考えられる。

Photo. 2 および 3 に接着界面の組織写真を示す。接着界面には境界層が認められ、圧下率が高くなると連続的になっている。この境界層は 1μ 以下で、XMA による定量分析は誤差の要因が多く、決定的なものが得られなかった。また熱処理によって合金層に成長している。

Photo. 4 は、圧延の際の接着界面における温度測定結果である。熱起電力の測定に際して、誤差の原因としては加工および圧力による熱起電力の変化、熱接点の接触抵抗による電圧降下などが考えられる。後者の場合、接触抵抗はシンクロスコープの内部抵抗に比べ非常に小さいので、電圧降下になる誤差は無視できる。加工や圧力による熱起電力の変化については、それぞれ ELAN⁽¹⁷⁾ や BRIDGMAN⁽¹⁸⁾ らによつて調べられている。それによるとほとんど無視できる程度である。したがって、Photo. 4 の測定は真温度にきわめて近いものと考えられる。

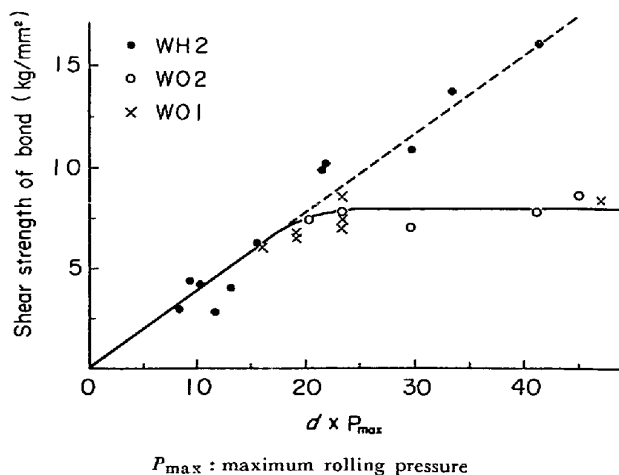


Fig. 7. Relation between shear strength and $d \times P_{\max}$. d : relative slip.



(a) (x440)



(b) (x440)



(c) (x440)

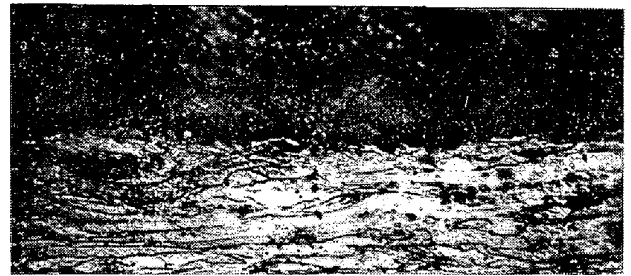
(5/7)

(a) as cold rolled, (b) tempered at 500°C for 1 hr.,
(c) tempered at 530°C for 3 hrs.

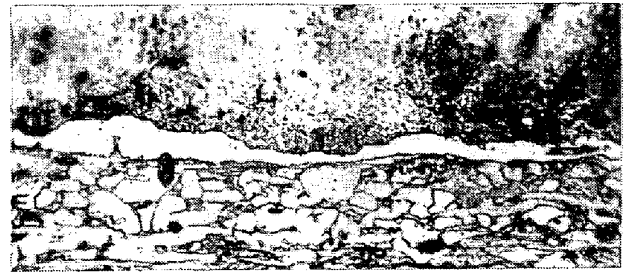
Photo. 2. Cross section of bond layer. (reduction 50%)



(a) (x440)



(b) (x440)



(c) (x440)

(5/7)

(a) as cold rolled, (b) tempered at 500°C for 1 hr.,
(c) tempered at 530°C for 3 hrs.

Photo. 3. Cross section of bond layer (reduction 70%)

Photo. 4 において、接着界面の温度は 0.1 秒間に上昇・下降がおり初期の 0.05 秒間の平均温度は約 650°C であり、0.001 秒のオーダーでは 1000°C 位に達していることがわかる。このような温度変化は F. P. BOWDEN や L. LEBEN⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾ らの行なつた 高圧相対すべりの研究結果と一致するものと考えられる。圧延後の圧延材の平均温度は 90~150°C 位であるが、このような圧延時の温度上昇の原因としては、相対すべりによるまさつ熱と変形による発熱とが考えられる。変形による発熱は、材料内部ではほぼ均一に生じると考えられるが、まさつ熱はすべり面で局所的に発生し、その結果急激な温度上昇がもたらされると考えられる。そしてその後の温度降下は、アルミと鉄の層を介しての放熱と考えられる。

以上の結果より、冷間圧延によるクラッド材の接着の機構を考察すると、圧延時の高い圧力により局部的な拡散を生じ同時に局部の相対すべりにより発生したまさつ熱により両種金属の相互拡散が促進され接着に至ると考

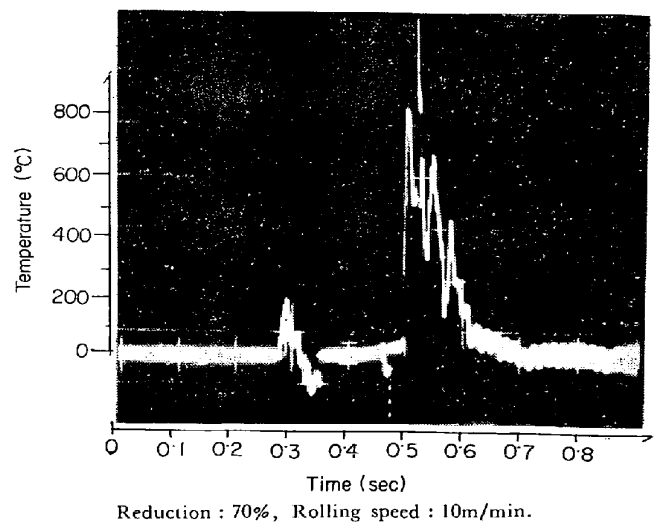


Photo. 4. Temperature of the Al-Fe boundary during cold rolling.

えることができる。その理由としては、鉄-アルミ系の共晶温度は 655°C であり、接着界面の温度は短時間で

はあるが共晶温度を上回っていること、また金属の再結晶温度は圧下率の増加により低下することなどが考えられる。

温度上昇は非常に短時間であるために、原子の拡散がどの程度進行するかが問題となる。しかし、まさつ熱によつて界面の温度が共晶温度より高くなれば、短時間でも加工などの影響と相まって拡散がいくらか生じるのではないかと考えられる。この問題については今後の課題である。

4. 結 論

アルミクラッド鋼の接着強度に対する諸因子の影響を検討した結果次の結論を得た。

- 1) 冷間クラッド法での接着強度を決める大きな要素は圧延の際の最大圧延圧力と相対すべりである。
- 2) 表面状態、板厚比、材質などの条件についてはこれらの要素を高めるものが良好な接着状態を与える。
- 3) 接着の機構は、圧延時に生じる高い圧延圧力により両方の金属原子が互に拡散を生じまたその部分の相対すべりによつて生じたまさつ熱により金属の拡散が著しく促進されて接着するものと考えられる。

後記：本研究は前田が九州大学大学院在学中に行なつたものである。

文 献

- 1) F. C. KELLY: *Welding J.*, (1951) Aug. p. 728
- 2) J. J. WATSON: *Blast Furnace and Steel Plant*,

(1953) Mar. p. 318

- 3) J. M. PARKS: *Welding J.* (1953) May. p. 209S
- 4) 石井：金属学会誌，20 (1956) 2, p. 89~92
- 5) 田中，吉識：軽金属，8-2 (1958)
- 6) R. E. TYLECOTE, D. HOWD, and J. E. EURMIDGE: *Brit. Weld. J.* (1958), Jan. p. 21
- 7) E. HOLMES, M.A., P.H.D.: *Brit. Weld. J.* (1959) Jan., p. p. 29
- 8) L. R. VAIDYANATH, M.G.N., D.R.M.: *Brit. Weld. J.*, (1959) Jan., p. 13
- 9) J. A. DONELAN: *Brit. Weld. J.*, (1950) Jan., p. 5
- 10) L. R. VAIDYANATH, D. R. M.: *Brit. Weld. J.*, (1960) Jan., p. 1
- 11) M. G. NICHOLAS, D. R. M.: *Brit. Weld. J.*, (1961) Aug., p. 375
- 12) M. G. NICHOLAS, D. R. M.: *Brit. Weld. J.*, (1962) Aug., p. 469
- 13) K. J. B. McEWAN, D. R. M.: *Brit. Weld. J.*, (1962) July., p. 406
- 14) 田中，福田：塑性と加工，6 (1965-4) 51, p. 202
- 15) 角川：第 22 回塑性加工連合講演会誌，11 (1971), p. 477
- 16) W. TRINKS: *Blast Furnace and Steel Plant*, (1937) June., p. 617
- 17) ELAN: *Proc. Roy. Soc. A*, (1935), p. 165, 568
- 18) BRIDGMAN: *Proc. Amer. Acad. Arts Sci.*, 53 (1918), p. 269
- 19) F. P. BOWDEN, L. LEBEN: *Proc. Soc.*, A169 (1938), p. 371
- 20) F. P. BOWDEN, K. E. W. R.: *Proc. Roy. Soc.*, A154 (1936), p. 640