研 究 論 文

アルミニウムと炭素鋼の摩擦圧接について*

蓮井 淳**小川 正幸***田中英樹****

Friction Welding of Aluminium and Carbon Steel*

by Atsushi Hasui**, Masayuki Ogawa*** and Hideki Tanaka****

In friction welding pure aluminium and 0.45 % carbon steel of 16 mm diameter, suitable welding condition and some fundamental phenomena are investigated. The continuous drive type friction welding machine is used.

Range of experimental condition is,
rotation speed: 3600 rpm,
heating pressure: 1.0–3.0 kg/mm²,
upsetting pressure: 1.0–4.0 kg/mm²,
heating time: 0.5–10.0 sec,
upsetting time: 10.0 sec,

Main results are as follows;

- (1) The joints, which has interfacial layer, break at the layer in tensile test. And they have the relatively lower tensile strength and crack initiation angle. Therefore, the interfacial layer lowers the property of the joint.
- (2) The condition, under which the interfacial layer is not generated, that is, the relatively higher heating pressure and upsetting pressure and the comparatively shorter heating time, can be suitable for welding of aluminium and carbon steel.
- (3) The interfacial layer is produced when the average temperature at the friction interface rises above some 500°C.
- (4) The interfacial layer consists of the intermetallic compounds, mainly, Fe₂Al₅ and FeAl₃.

1. 緒 言

近年, アルミニウム, アルミニウム合金は建築, 航空機の他, 種々の機械類に利用されており, その結果, アルミニウムと異種金属との接合にも高い関心が払われるようになった。摩擦圧接はこの要求にこたえる接合法として注目されているが, アルミニウムと炭素鋼の摩擦圧接についての報告は少ない¹⁾。

本研究は, アルミニウムと炭素鋼の摩擦圧接現象および圧接部の機械的性質の解明を通じて圧接条件を実験的に求めたものである。

2. 実験方法と母材

摩擦圧接には連続駆動方式(制動式)を用いた。圧接条件として, 回転数: 3600 rpm, 加熱圧力 P_h : 1.0~

3.0 kg/mm², アプセット圧力 P_u : 1.0~4.0 kg/mm², 加熱時間 T_h : 0.5~10 sec, アプセット時間 T_u : 10 sec を採った。なお, 本実験ではアプセット圧力の付加は制動開始と同時に進んだ。

供試母材は市販の純アルミニウム(1050)と機械構造用炭素鋼(S45C)で, それぞれ直径 16 mm, 長さ 100 mm に旋削したものである。

3. 圧接結果と圧接現象

3.1 圧接部外観

Photo. 1 (a)~(e) はアルミニウムと炭素鋼の圧接部外観を示したものである。これらにおいては圧接部のバリはすべてアルミニウムから生じ, 炭素鋼にはほとんど変形は見られない。

(a)~(d)は加熱圧力 P_h , アプセット圧力 P_u : 1.0 kg/mm², 加熱時間 T_h : 1.0, 3.0, 6.0, 10.0 sec の各条件で得た継手の外観で, バリは軸対称を保ちながら, T_h の増加とともに(a)~(c)では円錐型に, (d)では釣り鐘型に成長している。

(e)は $P_h = P_u$: 3.0 kg/mm², T_h : 1.0 sec の条件に

*原稿受付 昭和51年12月28日(昭和51年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 慶応義塾大学工学部 Member, Keio University, Faculty of Eng.

***学 生 員 慶応義塾大学大学院 Student Member, Keio University, Graduate School

**** 慶応義塾大学大学院 Keio University, Graduate School

Photo. 1 Appearance of welded joints
(Left: Aluminium, Right: S45C steel)

よる継手の外観で、バリは後方に反返るように成長している。

以上のようにアルミニウムと炭素鋼の圧接では、バリが軸対称に安定して発生しその外観は良好である。

3.2 よりしろ

Fig. 1 は加熱圧力 P_h = アプセット圧力 P_u とした場合のよりしろと加熱時間 T_h の関係を示したものである。ここで、よりしろは、前述のように炭素鋼がほとんど変形しないので、アルミニウムから生成されたものである。

よりしろは T_h のとともに比例的に増加し、その勾

Fig. 1 Relating between amount of upset and heating time

配は加熱圧力の増加につれて大きくなっている。しかし、 $P_h = P_u = 1.0 \text{ kg/mm}^2$ の場合、 T_h が 5.0 sec 以上になると、直線からはずれてよりしろの増加がゆるやかとなっている。

3.3 圧接継手の引張強さ

Fig. 2 は加熱圧力 P_h とアプセット圧力 P_u を等しくし、これを 1.0, 2.0 および 3.0 kg/mm^2 とした場合の継手の引張強さと加熱時間との関係を示してある。

Fig. 2 Relation between tensile strength and heating time

$P_h = P_u = 1.0 \text{ kg/mm}^2$ による圧接継手の引張強さは T_h の増加につれて若干減少する傾向が認められる。この場合、 $T_h : 1.0, 2.0 \text{ sec}$ では、継手はアルミニウム母材破断するが、 $T_h : 3.0, 4.0 \text{ sec}$ になると、破壊は圧接部または母材に生じるようになり、さらに T_h が 5.0 sec 以上になるとすべて圧接部で破断する。

一方、加圧力を高く 2.0, 3.0 kg/mm^2 とした場合、継手は T_h に関係なくすべてアルミニウム母材で破断している。

Fig. 3 は $P_h : 1.0 \text{ kg/mm}^2$, $P_u : 1.0, 2.0, 3.0 \text{ kg/mm}^2$ の条件で得られる継手の引張強さと加熱時間の関係を示したものであるが、 T_h が 4.0 sec 以上になると継手は圧接部で破断するようになり、 P_u を高くしても

Fig. 3 Effect of upsetting pressure on tensile strength

継手の引張強さにほとんど影響しないことがわかる。

Photo. 2 (a) にアルミニウム母材破断した継手の外観, (b) に圧接部破断した継手の外観, (c) にその破断面を示す。(c)においてアルミニウム側の破断面の外周部は剝離されたようになっており, その中心部においては渦巻状の傷跡が残っているのが観察される。一方, 炭素鋼側の破断面の外周部には灰白色の剝離片のようなものが見られる。

Photo. 2 Appearance of fractured specimens by tensile test and fracture surfaces

圧接部破断した継手の破断面にはこのような灰白色の剝離片がしばしば見られ, これが継手の引張強さの低下に関係しているのではないかと考えられる。

3.4 圧接継手の曲げ強さ

圧接部の接合性をさらに検討するため, 巻付け法による曲げ試験 (JISZ 2204-1969, JISZ 2248-1975) を行なった。試験片の直径は 16 mm, 曲げ半径は 9 mm とした。

Fig. 4 は加熱圧力 P_h : 1.0 kg/mm² で一定とし, アプセット圧力 P_u : 1.0, 3.0 kg/mm², および加熱時間 T_h : 1.0~4.0 sec の各条件によって作成した継手の曲げ試験において圧接部にクラックが生じた角度を加熱時間についてプロットしたものである。

曲げ角度は T_h が増すにつれて減少しており, また P_u が高いほど増加している。 T_h : 1.0 sec, P_h : 1.0 kg/mm², P_u : 4.0 kg/mm² にすると 180° 曲げてもクラックは生じない。また, 加熱圧力 P_h も同様な傾向を生じ, $P_h (=P_u)$ を 2.0, 3.0 kg/mm² と大きくし, T_h を短くすると, 継手の曲げに対する性能は向上する。

3.5 圧接面の到達温度

外挿法²⁾により圧接面の最高到達温度の推定をした。

Fig. 4 Effect of heating time and upsetting pressure on crack initiating angle

Table 1 Average temperature reached at interface at rotation stop

Ph (Kg/mm ²)	1.0						2.0		3.0	
Th (sec)	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	7.0	1.0	2.0	1.0	2.0
Temp. (°C)	420	480	520	590	610	620	510	560	540	570

* The temperature is estimated by extrapolation

Table 1 には種々の圧接条件における圧接面の推定到達温度を示してある。

これによると圧接面到達温度は加熱時間 T_h が同一ならば, 加熱圧力 P_h が高いほど高くなっている。同じ加熱圧力においては加熱時間 T_h が増大するほど上昇し一定の値に近づく。たとえば, P_h : 1.0 kg/mm² では T_h : 5.0 sec 以上になると圧接面到達温度は約 600~620°C 程度になる。

4. 圧接部の組織

Photo. 3 (a) は加熱圧力 P_h およびアプセット圧力 P_u : 1.0 kg/mm², 加熱時間 T_h : 1.0 sec の条件による圧接部の中心部および外周部の組織で, 両母材が十分に結合しているのが見られる。この条件による継手は引張試験を行なうとすべてアルミニウム母材破断をした。

Photo. 3 (b) は $P_h = P_u$: 1.0 kg/mm², T_h : 3.0 sec の条件による圧接部の組織である。この境界面では不連続な灰白色の中間層が発生しているのが見られる。この層は中心部できわめて薄く, 外周部ではそれよりもやや厚くなっている。この継手では引張試験において破断はアルミニウム母材または圧接部で生じ, その破断位置は不安定になった。

Photo. 3 (c) は $P_h = P_u$: 1.0 kg/mm², T_h : 10 sec の条件による圧接部の組織である。この場合圧接面境界に生ずる灰白色の中間層は外周部においてその厚さが増し, 連続して生成されているのが観察される。しかし中

Photo. 3 Micro-structures of welded joint (Left: Part close to the periphery, Right: Central part, Etchant: 2% Nital)

心部に近づくと、この中間層は薄く、かつ、不連続になっている。この圧接継手はすべて圧接部破断している。

Photo. 4 は $P_h = P_u : 3.0 \text{ kg/mm}^2$, $T_h : 1.0 \text{ sec}$ の条件による圧接部の組織である。中心部では十分な結合がなされているが、外周部にはごく薄い中間層が生成しているのが観察される。このような状態の継手では、引張試験においてアルミニウム母材破断をした。

以上のことから、圧接境界における中間層の生成は、圧接継手の引張性能を低下させる一つの要因であることがわかる。しかし、高加圧力で圧接された継手のように、中間層が Photo. 4 に示した程度に境界面の一部に不連続にわずかに生成しているような継手では、中間層は継手の引張性能にあまり影響を与えるものではないと考えられる。

Photo. 5 は圧接境界面に中間層が生成している継手 ($P_h = P_u : 1.0 \text{ kg/mm}^2$, $T_h : 5.0 \text{ sec}$ の条件による) についての曲げ試験において、圧接部に生じたクラック先端部の状態を示したものである。これを観察すると、クラックが中間層中、あるいは中間層近傍をぬって伝播しているのが認められ、中間層がクラックの発生、伝播に影響していることを示している。このような観察お

Photo. 4 Micro-structures of welded joint (Etchant: 2% Nital)

Photo. 5 Crack of the bent specimen ($P_h = P_u : 1.0 \text{ kg/mm}^2$, $T_h : 5.0 \text{ sec}$)

び前述の曲げ試験結果と中間層の生成状況とを考え合わせると、中間層の生成は曲げ角度を低下させる原因となっているのは確かである。

以上を総合すると、圧接境界における中間層の生成状態と圧接継手の性能の低下とは強い関連があると結論される。

つぎに中間層の組成について調べるため、EPMA による分析を行なった。

Photo. 6 は $P_h = P_u : 1.0 \text{ kg/mm}^2$ において、 T_h を 5.0 sec として得た継手の中間層を EPMA で線分析したものである。これによると中間層は化合物 Fe_2Al_5 から成っているといえる。

またこの中間層を水酸化ナトリウム液で腐食³⁾したと

Photo. 6 Analysis of the weld interface about 0.5 mm inside the periphery by EPMA (Etchant: 2% Nital)

ころ, 中間層のアルミニウム側に FeAl_3 の発生を示す暗黒点を呈する部分があり, ここに FeAl_3 がわずかに生成していることがわかった。しかし, この FeAl_3 層は層が薄いために EPMA による分析結果には明確に現われなかったものと考えられる。

以上のことから圧接面境界に生成する中間層の組成は主に Fe_2Al_5 と中間層のアルミニウム側に薄く生成する FeAl_3 とから成っていると考えられる。

なお, このような中間層の生成と前述の圧接面到達温度の測定結果を対照すると, 圧接面が約 500°C 以上に加熱された場合に中間層が生成することがわかる。

5. 結 言

本研究は連続駆動方式の摩擦圧接において, 純アルミニウム (1050) と炭素鋼 (S45C) の接合性について継手の機械的試験, 圧接現象および圧接部の顕微鏡組織観察などによって検討, 考察を加えたものである。用いた圧接条件範囲は回転数: 3600 rpm, 加熱圧力 P_h : $1.0 \sim 3.0 \text{ kg/mm}^2$, アプセット圧力 P_u : $1.0 \sim 4.0 \text{ kg/mm}^2$, 加熱時間 T_h : $0.5 \sim 10 \text{ sec}$, アプセット時間 T_u : 10 sec である。

この実験範囲において得られた主な結果をまとめる

と, 次のようになる。

(1) 圧接面に中間層が生成する条件による継手では, 引張試験において圧接部に破断を生じ, また引張強度および曲げ角度が減少して, 継手性能が低下する。

(2) アルミニウムと炭素鋼における適正圧接条件は, 圧接面に中間層が生じないような条件, すなわち, 加熱圧力 P_h , アプセット圧力 P_u が高く, 加熱時間 T_h が短い場合であるといえる。

(3) 中間層は圧接面が約 500°C 以上の温度に加熱された場合に生成される。

(4) 圧接面に形成された中間層の成分は主に Fe_2Al_5 と FeAl_3 の金属間化合物である。

最後に, 本実験に熱心に協力された矢儀俊郎君 (現富士通) に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 岡村, 富田: 摩擦圧接研究会資料 No. 47 (昭44)
- 2) A. Hasui, S. Fukushima and J. Kinugawa: Experimental studies on friction welding phenomena, Trans. NRIM, 10-4 (1968) 207-225
- 3) 和泉, 諸住, 寺沢: 金属組織写真集, 非鉄材料編, 丸善, (昭47), 158

鋼の溶接熱影響部の結晶粒粗大化に及ぼす析出物の影響*

井川 博** 大重広明** 馬久地裕*** 野井伸悟****

Effect of Precipitates on Grain Growth of Steel in Weld-Heat Affected Zone*

by Hiroshi Ikawa**, Hiroaki Oshige**, Yutaka Mekuchi*** and Shingo Noi****

Effect of precipitates on austenite grain growth in weld-heat affected zone (HAZ) was investigated using AlN-bearing steel. That is, grain growth and the behavior of precipitates during rapid heating were examined. Then, grain size in HAZ was examined. In these cases, initial amount and size of precipitates were controlled by pre-heat treatment.

Main results obtained are as follows.

1) During rapid heating

If initial value for r/f (r : radius of precipitates, f : volume fraction of precipitates) is sufficiently large,

*原稿受付 昭和52年6月3日 (昭和48年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

***正 員 日産自動車(株) Member, Nissan Motors Co., Ltd.

****正 員 (株)新潟鉄工所 Niigata Engineering Co., Ltd.