銅-アルミニウム摩擦圧接継手のプレス加工材について*

蓮井 淳**, 菅 泰雄**, 小林 博行***

On Pressed Plate of Copper-aluminium Friction Welded Joint*

by Atsushi Hasui**, Yasuo Suga** and Hiroyuki Kobayashi***

A suitable friction welding condition to obtain the joint between pure copper and pure aluminium, which had joint efficiency over 100%, was decided. And the welded joint was pressed in the direction of diameter. Mechanical properties, i.e., tensile strength, bend ductility and hardness, micro-structure and fracture behaviour of the as-welded joint and the pressed joint were investigated.

Reduction R was defined as follows:

$$R = (d - t) / d \times 100\%$$

where d : diameter of joint before pressworking,
 t : thickness of pressed joint.

Main results are summarized as follows.

- (1) Tensile strength of the welded joint increases with an increase of reduction ratio and tensile fracture of the joint, pressed in the reduction ratio of above 20%, always takes place in aluminium base metal.
- (2) In the cases of reduction ratios of 40% and 48%, the joints have sufficient ductility so that they are able to be bent up to 90° without cracking in bend test. It seems that improvement of ductility by pressworking is owing to spherical projection of weld interface from copper side to aluminium side.
- (3) When the pressed joint is broken in tensile test, fracture takes place in aluminium at the position adjacent to weld interface, that is, it takes place in the alloyed layer and aluminium base metal and at the boundary between alloyed layer and aluminium.

Key Words: Pressworking, Friction welded joint, Copper, Aluminium, Mechanical properties

1. 緒 言

摩擦圧接法は、かなり異質な材料の接合を簡単に行なうことができるという大きな特色をもっている。しかし、本法は、一般的には、少なくとも一方の母材の断面形状が円形でなければならないという、接合の原理に基づく短所をもっている。そこで、摩擦圧接によって作製した異種材料の丸棒継手を直径方向に圧縮して板材とする加工について検討を加えた。

銅とアルミニウムの継手は電気機器、熱交換器などに用いられているが、銅とアルミニウムが完全に接合された板状材料が簡単に製作されるようになれば、その用途はさらに拡大されるものと思われる。本研究では、まず、十分な引張強さをもつ銅とアルミニウムの摩擦圧接継手を作製後、それを直径方向にプレス加工した。次いで、その加工材（板状材料）の機械的性質、圧接部の組織、さらに圧接部の破断状態などについて検討を行なった。本文はその実験結果についての報告である。

2. 母材と実験方法

本実験に用いた母材は純銅棒 (C1020B) と純アルミニウム棒 (A1050B) である。なお、プレス加工における変形を容易にするため、銅棒母材には 400℃、1h の焼なましを施した。圧接母材の直径は 16mm である。

摩擦圧接には連続駆動式圧接機を用いた。圧接条件因子を種々に組合せて予備実験を行なった結果、継手効率

Table 1 Welding condition

Rotational speed	N	2440 rpm
Friction pressure	P ₁	39 MPa
Upsetting pressure	P ₂	69 MPa
Friction time	T ₁	0.5 s
Upsetting time	T ₂	10 s

$$R = \frac{d - t}{d} \times 100 (\%)$$

d : diameter before pressworking
 t : thickness after pressworking

Fig. 1 Pressworking and definition of reduction ratio

100% 以上の圧接継手が安定して得られる条件として、Table 1 に示すものが求められた。この圧接条件によって得られた継手を直径 15mm の丸棒に旋削した後、Fig. 1 に示すように、平面金型で継手の直径方向にプレスして、板材とした。プレス加工に当って、潤滑剤としてワセリンを用いた。

ここで、プレス加工度 R を次式で定義する。

$$R = (d - t) / d \times 100\%$$

* 原稿受付 昭和61年4月5日昭和60年度秋季全国大会で発表

** 正 員 慶応義塾大学 Member, Keio University

*** 慶応義塾大学大学院(現日本鋼管(株) Keio University
(Present address: Nippon Kokan K.K.)

Fig. 2 Appearance of pressed joints (4.9 MN)

ただし d はプレス加工前の丸棒の直径, t はプレス加工材の厚さである。

プレス加工において、圧接部の変形状態を簡単にするために、圧接部付近における塑性変形が幅方向にのみ生じて、軸方向には殆んど生じないような継手の長さを調べた。Fig. 2 は、圧接面から 5 mm 間隔で円周に浅い切込みを入れた直径 15 mm、長さ 50~90 mm の継手(A)とそれを加圧力 4.9 MN でプレス加工した継手(B)を示したものである。これらの写真から、プレス加工材の圧接部付近において、幅方向の変形を生じ、切込み線の軸方向の変形が殆んど見られない継手の長さは 70 mm 以上であることがわかる。従って、プレス加工に用いる継手は直径 15 mm、長さ 70 mm (銅: 35 mm, アルミニウム: 35 mm) の丸棒に一定した。

なお、本研究に用いたプレスの容量は 4.9 MN (50 tonf) で、この継手材の圧縮では、加工度 60% が限度であるので、この範囲において実験を行なった。

3. 実験結果と考察

3.1 プレス加工

Fig. 3 は圧接継手材および長さ 70 mm の銅母材とアルミニウム母材の圧縮において単位長さ当りの加圧力と加工度の関係を示したものである。いずれにおいても、加工度の増大と共に加圧力は増大するが、加工度が大きくなると、曲線の勾配は急激に増大している。これは、加圧の進行に伴う受圧面の増大のためである。

3.2 プレス加工された継手の機械的性質

種々の加工度にてプレス加工された圧接継手について引

Fig. 3 Relation between reduction ratio and compression pressure

張試験、曲げ試験および硬度試験を行なった。

(1) 引張試験

引張試験片の平行部の長さを 20 mm とし、平行部断面は長方形で、その幅と厚さの比を 2.5 : 1 に一定した。

Fig. 4 はプレス加工された圧接継手とアルミニウム母材の引張強さと加工度の関係を示したものである。圧接のままの継手は、試験片の断面が円形の場合には、すべてアルミニウム母材で引張破断するが、上記の試験片のように、断面を長方形にすると、圧接部で破断することがある。プレス加工された継手の引張破断は、加工度 20% 程度までの継手においては、圧接部に生ずることもあるが、加工度をそれ以上にすると、すべてアルミニウム母材内に生じている。

また Fig. 4 の中に、圧接部において破断させるため、その両側に深さ 1 mm の U ノッチを入れた試験片と同様なノッチを入れたアルミニウム母材の試験片による引張試験の結果を示してある。いずれにおいても、引張強さは加工度の増大に伴い増加し、プレス加工されたものでは、圧接部の引張強さの方がアルミニウム母材のそれよりも高くなっている。

Fig. 4 Relation between tensile strength of pressed joints and aluminium base metal and reduction ratio

なお、圧接部での引張破面は、すべて銅側もアルミニウム側も灰色を呈している。このことから、破断は、銅とアルミニウムの圧接面ではなく、圧接面からアルミニウム側にわずかに入った位置で生じたことがわかる。

(2) 曲げ試験

曲げ試験は、断面が長方形で、引張試験片と同様に、幅と厚さ(t)の比を2.5:1とした。曲げ試験は、ポンチ半径(r):10mm、支持ロール半径:12.5mm、スパン(L)= $2r+3t^{1)}$ とし、曲げ角度は90°までとした。

Fig. 5 Appearance of specimens after bend tests

Fig. 5 は曲げ試験後の試験片の外観を示したもので、90°まで曲げる過程における変形と破壊の状態によってA, B, CおよびDの4種類に分けた。Aは90°曲げても、圧接部に亀裂が生じないで、高い曲げ延性をもつもので good, Bは90°曲げる途中において圧接部に亀裂が生じたものの破断には至らないもので relatively good, Cはある程度の角度までは曲ったが、圧接部で破断したもので poor, Dは少しの曲げにおいて圧接部で破断したもので bad とする。AおよびBにおいては、アルミ

ニウム側の表面に大きな塑性変形によるすべり模様が見られる。Cでは、延び側のアルミニウムがかなり絞られていて、銅側の破面に一部アルミニウムが結合した状態で残っていることがある。Dにおける破面は銅側およびアルミニウム側とも灰色を呈し、この場合も、破断面が圧接面からアルミニウム側へわずかに入った位置に生じたことを示している。

Table 2 は、5種類の加工度のプレス加工した継手の試験片について、それぞれ5回試験を行なった結果を、上記の判定によって分類したものである。圧接のままの継手では、丸棒試験片による曲げ試験において良好な曲げ延性を示すのに対して、断面長方形の試験片は、すべて圧接部で脆く破断している。そして、加工度の増大と共に曲げ延性が向上し、加工度40~48%において最も良好となった後、54%では幾分低下している。

(3) 硬度試験

Fig. 6 および Fig. 7 は圧接のままの圧接部および良好な曲げ延性の得られた加工度48%のプレス加工された圧

Fig. 6 Hardness distribution of as-welded joint (R=0%)

Fig. 7 Hardness distribution of pressed joint (R=48%)

Table 2 Results of bend tests

Test R(%)	1	2	3	4	5
0	●	●	●	●	●
15	◐	◐	◐	●	●
28	△	△	◐	◐	◐
40	○	○	○	○	△
48	○	○	○	○	△
54	○	○	△	△	◐

○ Good △ Relatively good
◐ Poor ● Bad

接部の断面の硬さ分布 (0.2 mm 間隔) を示したものである。

圧接のままの圧接部において、アルミニウム側では、中心部、外周部とも Hv 35～40 程度で、圧接部における変形と熱影響による硬さの変化が認められないが、銅側では、圧接面近傍で幾分硬化し、中心部では約 Hv 90、外周部では約 Hv 80 であるが、圧接面から離れるに従って、それぞれ、約 Hv 70、約 Hv 60 と低下した後、中心部、外周部とも Hv 80 程度になっている。

プレス加工された圧接部において、圧縮方向に平行な中央部横断面 (以後、平行断面と呼ぶ) で、アルミニウム側および銅側の外周部①と中心部②では、硬さの上昇が見られ、ともに銅側の中心部での上昇は著しい。これに対して、圧縮方向に垂直な中央部断面 (以後、垂直断面と呼ぶ) の幅方向の端部③では、硬さは圧接のままの圧接部の外周部のそれとほぼ同一のレベルにあり、加工硬化を生じていないことから、この領域においてはプレス加工による変形が小さかったものと考えられる。

3.3 圧接部の組織

Fig. 8(A) および(B), (C)は、それぞれ、圧接のまま ($R=0\%$) および加工度48%のプレス加工を施した圧接部の断面のアルミニウム側のマクロ組織を示したものである。圧接のままの圧接部では、アルミニウム母材の繊維組織が外周方向へ流れて、中心部で薄く、外周部で厚い逆円錐形の変形層を生じている。さらに、圧接面付近で、圧接面に沿って鈍い光沢を有する層が認められ、その外側に白く見られる層が弧状に生じている。これをプレス加工すると、垂直断面(B)と平行断面(C)において見られるように、逆円錐形の変形層は幅方向に拡大され、厚さ方向には圧縮されている。しかし、軸方向への拡がりは見られない。これは、Fig. 2 によって調べたプレス加工された継手における変形の分布と符合している。

Fig. 8 Macro-structures of as-welded joint and pressed joint (aluminium side)
Etchant: 5% hydrofluoric acid

Fig. 9 は圧接のままの圧接部のアルミニウム側のミクロ組織 (偏光撮影) を示したものである。圧接面に近づくに伴って、繊維組織が次第に流れ、圧接面近傍では結晶粒が微細化している。Fig. 10 および Fig. 11 は、それぞれ、加工度48%のプレス加工された圧接部の垂直断面および平行断面におけるアルミニウム側のミクロ組織

Fig. 9 Micro-structures of as-welded joint
Etchant: 0.5% hydrofluoric acid, polarized-light micrographs

Fig. 10 Micro-structures of pressed joint ($R=48\%$), section perpendicular to compression
Etchant: 0.5% hydrofluoric acid, polarized-light micrographs

で、いずれにおいても、Fig. 9 に見られた組織に、プレス加工に対応する変形を生じているのが見られるが、両者に本質的な相違は認められない。この微粒化した領域が Fig. 8 において白く弧状に見られた部分に対応する。

さらに、Fig. 12(A) は、圧接のままの圧接部の中心部および外周部の圧接面近傍の組織を示したもので、アルミニウム側へ銅の混入した層を生じている。この合金層は

Fig. 11 Micro-structures of pressed joint ($R=48\%$), section parallel to compression
Etchant: 0.5% hydrofluoric acid, polarized-light micrographs

(A) $R = 0\%$

(B) $R = 48\%$ Section perpendicular to compression

(C) $R = 48\%$ Section parallel to compression

Central part Peripheral part 20 μm

Fig. 12 Micro-structures of as-welded joint and pressed joint
Etchant: 0.5% hydrofluoric acid

中心部において極く薄く、外周へ向うに従って、厚さが増大し、 $20\sim 30\mu\text{m}$ に達している。(B)および(C)は、加工度48%のプレス加工された圧接部の垂直断面および平行

Fig. 13 EPMA analyses of aluminium and copper in cross section of as-welded joint

断面の中心部と外周部の組織を示したもので、この合金層においても、プレス加工に対応する変形を生じているが、本質的な変化は認められない。この合金層は、Fig. 8において、鈍い光沢を有する層として観察された部分である。

Fig. 13 は、圧接面に沿う合金層における銅とアルミニウムの含有量を EPMA によって軸方向に線分析した結果である。これによると、この場合には、圧接面から $30\mu\text{m}$ にわたって、銅が数%まで混入した層が存在しているのがわかる。

なお、前報²⁾の結果から判断すると、用いている圧接条件、すなわち母材直径が 16mm 、回転数が 2440rpm 、摩擦圧力が 39Mpa 程度で、摩擦時間が 0.5s と短い条件では、Fig. 12 で線状に見える圧接境界に局部的溶融による合金層は生成されていないと思われる。

3.4 加工度と曲げ延性の関連についての考察

圧接部の曲げ延性が加工度の増大と共に向上し、加工度48%において最高に達した後、54%で幾分低下することを3-2(2)項で述べた。この理由として、プレス加工による圧接部のアルミニウム側における組織、すなわち、材質の変化と圧接面形状の変化などが考えられる。圧接部のアルミニウム側の組織を対象とするのは、圧接部で破断するときには、常にこの部分で破壊が生ずるからである。

圧接部のアルミニウム側の組織は、前項の顕微鏡観察によると、圧接によって銅を混合している層が圧接面付近に生じ、これがまたプレス加工によって変形している。現在のところ、圧接部の曲げ延性の向上と組織変化との関連については明らかにできなかった。今後、このことについては検討を続けたい。

次に、圧接部の曲げ延性に対する圧接面の形状変化の効果について調べる。圧接のままでは、銅母材の平な開先面の状態がそのまま残るので、圧接面は平面である。継手をプレス加工すると、圧接面は銅側からアルミニウム側へ円弧状に張出し (Table 3 の付図参照)、その量が加工度と共に増加する。そこで、銅母材の開先面を円錐形とし、その高さ h をプレス加工による円弧の張出し量と同程度にとった。すなわち、圧接のままの継手の状態

Table 3 Tensile tests of as-welded joints, obtained by using copper base metals with conical faying faces

Height of cone (mm)	Round section		Rectangular section		
					(MPa)
0	118*	98	○	95	●
0.5	118*	97	○	95	○
1.0	119*	96	○	94	○
2.0	118*	97	○	95	○

* Tensile strength of specimen with a notch at weld interface

Fracture location

- Al base metal
● Al base metal or weld

で、プレス加工された継手と同程度に銅がアルミニウム側に張出している継手を作製した。開先面が平面の場合に比べて、圧接現象が若干異なるが、ばりの発生状態、圧接部の組織が殆んど同じである。すなわち、圧接部の組織は同一で、圧接面の形状のみ、プレス加工した圧接部に類似した圧接部をもつ継手が得られる。これから前と同様の試験片を削出して、引張試験と曲げ試験を行った。

Table 3 は引張試験の結果を示しものである。銅母材の開先面が平面あるいは円錐面のいずれの場合においても、圧接部の引張強さは同一のレベルにある。しかし、開先面を円錐形にして作製した継手では、試験片の平行部断面が長方形のもので、すべてアルミニウム母材で破断するようになる。

Table 4 は、それぞれの試験片について4回行った曲げ試験の結果を示したものである。平面の開先面による継手は、すべて圧接部で脆く曲げ破断したが、開先面を円錐形にすると、圧接部の曲げ延性は向上し、その高さが1.0 mmの場合に最高の曲げ延性を示し、2.0 mmに増加すると、多少低下している。これはプレス加工された継手における曲げ試験の

Table 4 Bend tests of as-welded joints, obtained by using copper base metals with conical faying faces

Test h (mm)	1	2	3	4
0	●	●	●	●
0.5	△	●	●	●
1.0	○	○	○	○
2.0	○	○	○	△

- Good △ Relatively good
● Poor ● Bad

Fig. 14 SEM fractographs of fracture surface of as-welded joint (aluminium side)

結果と同じ傾向を示していることから、銅のアルミニウム側への張出しによる圧接面形状の変化は圧接部の曲げ延性の向上に寄与する因子であることを示唆している。

曲げ試験における圧接部の応力および変形について、今後、詳しく検討を行なう必要がある。

3.5 プレス加工された圧接部の破断面

継手の圧接面にノッチを入れて、圧接部の破断した破面を走査電子顕微鏡で観察した。破面はいずれも、3.2 (1)および(2)で述べたように、圧接面からアルミニウム側へ入った位置に生じている。

Fig. 14 は圧接のままの圧接部の破面（アルミニウム側）の中心部および外周部を示したものである。中心部では、合金層が極めて薄く、破面は平坦になっている。破面に見られる平行な筋の間隔は開先面切削のときの送りと同一である。また、ばりはアルミニウム側からのみ排出されるので、この筋は銅母材の開先面の切削痕に対応するものである。外周部では、破面に部分的に合金層が付着しているのが見られる。また、延性破壊の特徴であるディンプルが部分的に切削痕に沿って生じている。以上のことから、破断は、圧接部の中心部では薄い合金層あるいはそれとアルミニウムの境界で、外周部では混合層、合金層とアルミニウムの境界あるいはアルミニウム母材内で生ずるものと思われる。

Fig. 15 SEM fractographs of fracture surface of pressed joint in reduction ratio 48% (aluminium side)

Fig. 15 は加工度48%のプレス加工された圧接部の破面(アルミニウム側)を示したものである。中心部のBの部分では、切削痕が楕円形となっていてプレス加工を受けたことが認められるが、外周に近いCの部分では、それ程大きな変形を生じていないことがわかる。3.2(3)硬度試験に示したように、プレス加工された継手の垂直断面の端部においては加工硬化を生じていないことも符合している。上面に近い外周部Aでは合金層が砕かれたような状態になっている。また、この部分では切削痕の間隔もかなり密になっている。ディンプルは、A、Bの部分ではほとんど認められず、圧接のままの圧接部の外周部の破面の状態に近い破面を呈する部分Cにおいて極く僅かに小さく生じているのが見られる。

このような破面観察からは、加工度48%のプレス加工された圧接部において曲げ延性が著しく向上する理由を知ることができなかった。

4. 結 語

継手効率100%以上の純銅と純アルミニウムの摩擦圧接継手を直径方向にプレス加工して、両材料複合の板材を製作する方法について検討を加えた。まず、継手のプレス加工による変形状態を調べた後、作製された板材の機械的性質、圧接部の組織、さらに破壊の様相などについて検討を加えた。

用いた圧接継手の直径は15mmで、これを加工度60%程度までプレス加工した。加工度 R は次式で定義した。

$$R = (d - t) / d \times 100\%$$

ここに、 d は継手の直径、 t はプレス加工された板材の厚さである。

得られた主な結果は次のようである。

(1) 継手の引張強さは、加工度の増大と共に向上し、加工度約20%以上では、常にアルミニウム母材において破断する。

(2) 継手圧接部の曲げ延性は、加工度の上昇に伴い向上し、40~48%程度で最も良好となる。さらに、これ以上の加工度においては圧接部の曲げ延性は若干低下する。この原因の一つとして、プレス加工による圧接面の変形、すなわち、圧接面のアルミニウム側への円弧状の張出しが考えられる。

(3) 圧接面近傍のアルミニウム側に銅の混入した層を生ずる。この合金層の厚さは中心部では極く薄く、外周に向うに従って厚くなり、20~30 μm 程度に達する。プレス加工によって、この層に変形を生ずるが、組織には大きな変化は認められず、曲げ延性の向上とは関連づけられなかった。

(4) プレス加工された継手が破断するときは、破壊は圧接面からアルミニウム側へ僅かに入った位置に生じ、破面は合金層、合金層とアルミニウムの境界およびアルミニウム母材に生じている。

最後に、プレス加工において御世話になった慶応義塾大学理工学部吉井研究室ならびに熱心の実験に協力された学生高田浩司(現日産自動車株式会社)、久保純一、波多野治(現三菱重工業株式会社)、杉窪利浩(現株式会社キャノン)の諸君に深く感謝します。

なお、本研究の一部は昭和60年度文部省科学研究費助成金によって、記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 須藤：材料試験法，内田老鶴園新社(1983)，63
- 2) 薮井，福島，衣川：銅とアルミニウムの摩擦圧接について，金材研究報告，12-2(1969)，223-239

電子ビーム溶接継手の高温クリープ強度および脆化の研究*

—2¼Cr-1Mo 鋼タービンケーシングの電子ビーム溶接(第2報)—

喜多久直**，中崎隆光**，坪 洋二**，小林 計***，漆谷春雄***，桐原誠信**，吉岡孝利***

Study on High Temperature Creep Strength and Embrittlement during Service of Electron Beam Welded Joint*

—Electron Beam Welding of 2¼Cr-1Mo Steel for Steam Turbine Casing (Report 2)—

by Hisanao Kita**, Takamitsu Nakazaki**, Yoji Akutsu**, Kei Kobayashi***,
Haruo Urushidani***, Seishin Kiriha** and Takatoshi Yoshioka***

Characteristics of creep rupture strength and brittleness under steam turbine operation for 2¼Cr-1Mo steel plate EB welded joint have been investigated besides that of high temperature strength and stress relief cracking reported already. As the result, high-intermediate pressure outer casing of 380MW steam turbine have been manufactured by welded structure of 2¼Cr-1Mo steel plate in stead of Cr-Mo-V cast steel previously used.

Results are summarized as follows;

- (1) 10⁵ Hr creep rupture strength of EB welded joint satisfies with scatter band of base metal and allowable

* 原稿受付 昭和60年11月1日 昭和60年10月電子ビーム溶接研究委員会発表

** 正 員 (株)日立製作所 Member, Hitachi Ltd.

*** (株)日立製作所 Hitachi Ltd.