Fig. 8 Flattened specimen manufactured by High Plasma process.

5. 結 言

溶接管の接合過程を予・加熱と溶融接合に両分し、エッジの予・加熱には加熱効率と制御性に優れた高周波を適用し、これによって TIG、プラズマ、レーザの高密度エネルギーを接合しようとするエッジの溶融接合に傾斜投入することを特徴とする新溶接システムについて、本報ではとくにプラズマ溶接法と高周波予熱の組合わせに着目し、実機ミルを使用してステンレス鋼管 SUS304 60.5 mmφ×3 mm_t を実際に製造し、その溶接特性を確認した。

本研究によって得られた結論は以下のとおりである。

(1) 誘導コイルとインピーダ位置を適切に配置すれば、高周波誘導コイルからの交番磁界がアークプラズマ流に悪影響を及ぼしたり溶接作業の障害になることはない。

(2) エッジを最大 773 K (500°C) 程度まで誘導加熱するときの消費電力は、10 kW 程度に留まり、十分経済的

である。電源設備も小規模ですむ。

(3) 高周波によるエッジの予熱温度の上昇とともに、プラズマ溶接速度を大幅に増加できる。723~773 K (450~500°C) の比較的低温の予熱でも、従来のプラズマ単トーチの溶接速度の 2 倍以上の高速溶接が可能であり、さらなる増速の可能性も十分にうかがえる。

(4) 溶接ビード幅の表裏面差が狭まる傾向がみられる。しかし、従来品と同等の溶接部の健全性と強度が保存される。

以上の実験結果を総合すれば、高周波予熱とプラズマ溶接を組合わせた新溶接システムは、比較的低コストで設備能力、生産性を向上させ得る技術であり、ステンレス鋼の他、ニッケル合金やチタンとその合金など、従来のプラズマ溶接や TIG 溶接が守備してきた多くの材料にも適用可能と推定される。

なお、高周波予熱と TIG 溶接とを組合わせたシステムについては単トーチ法、複列トーチ法いずれの場合も同様の高速化が可能であり、また高周波予熱とプラズマ+TIG 溶接でさらに高速化できることを確認しており、予熱温度と製管速度・ビード形状の関係をも含めて続報にて報告することとする。

参 考 文 献

- 1) 新沼ら, 5 kW CO₂ レーザ溶接機による溶接ステンレス鋼管製造技術の開発, 材料とプロセス, Vol. 3 (1990), 541.
- 2) 日本塑性加工学会, ロール成形 (1990), コロナ社.
- 3) 吉川ら, 電縫鋼管の複合加熱溶接に関する基礎検討, 材料とプロセス, Vol. 3 (1990), 888.
- 4) 疋田ら, 複合加熱溶接による電縫鋼管の製造, 材料とプロセス, Vol. 3 (1990), 889.
- 5) 稲葉ら, 高周波予熱プラズマ法の開発, 材料とプロセス, Vol. 4 (1991), 578.
- 6) 稲葉ら, 高周波予熱レーザ法の開発, 材料とプロセス, Vol. 4 (1991), 579.

銅－異種材加圧はんだ付継手の特性*

服巻 孝**, 中村 満夫***

Characteristics of Press-soldered Joints of Copper with Dissimilar Materials*

by Takashi Haramaki** and Mitsuo Nakamura***

Copper and some other materials were joined using the resistance heating apparatus by which heating and pressure could be applied simultaneously. The materials used were presoldered and the alloyed layer was formed on each of them by using Pb-Sn solder.

Tensile test at the room temperature revealed that fracture of all specimens originated in copper material.

The layers consisted mainly of Cu-Sn, Cu-Zn-Sn, Cu-Ni-Sn, Cu-Fe-Ni-Sn when copper, brass, nickel, and Fe-42Ni alloys were jointed with copper respectively.

Key Words: Soldering, Alloyed layer, Tensile shear load, Copper to other metals, Press-soldering, Pb-Sn solder

*原稿受付 平成3年9月5日 平成2年度秋季全国大会で発表

**正 員 日立製作所 Member, Hitachi, Ltd

*** 日立製作所 Hitachi, Ltd

1. 緒 言

Pb-Sn系はんだは低融点で且つ作業性が良好な観点から、電気導体部品の接続に広く利用されている。近年、電気機器、部品の小型軽量化と高出力化の要求に対処するため、部品の実装密度が増し、接続部にかかる電気負荷も増大、機器の設計仕様温度が上昇する傾向にある。そのために、耐熱性の低い従来のはんだ付では品質的に要求に対応することが困難な場合も生じてきている。

一方、多くの場合、導体コイル接合部の近傍部にはエナメル被覆や有機樹脂による絶縁処理が施されているため、接続に当たり、接続部近傍を高温に加熱できず、銀ろう付等が出来ないという場合がある。

著者等はこの問題に対処するため、接合は比較的低い温度で行うけれども、接合後は高い強度と耐熱性を有する接合部が得られる「加圧はんだ付」方法を開発し、その適用を試みて来た¹⁻³⁾。加圧はんだ付の特徴は、はんだ成分中の反応元素と母材とを反応させて薄い合金層を形成させた後、低融点、低強度のはんだ成分の液相を加圧により排出させ、高い融点と強度を有する合金層同士の接合からなる継手を得る方法である。

これまでに、銅同士の加圧はんだ付継手は、加熱と加圧が同時に付与出来る通電抵抗装置を用いることにより、初期の接合強度³⁾はもとより、長期高温放置試験等⁴⁾後においても高い接合強度を有していることを示した。

本報では、加圧はんだ付の適用拡大を図るため、電機・電子機器の端子材料等として広く採用されているFe-40%Ni-0.5%Mn合金(以下Fe-42Niと略す、数字はmass%で示す)、ニッケル及びBsP(黄銅)の3種の材料と銅との継手について、接合部の電気抵抗、引張強さ並びに合金層厚さ等について検討を加えた。

2. 供試材料及び実験方法

Table 1は、供試材の形状と成分を示す。直径0.8mmのCu線はポリエステル線の被覆をはがして用いた。はんだ材としては、これまでのCuとCuの加圧はんだ付の検討結果、Sn及びPb-50%Snはんだが良い結果を与えていること^{3,4)}、Cu合金またはNi系材料の加圧はんだ付においても継手特性に対しはんだ成分中のSnが影響を及ぼすことを考慮して、本実験でも融点の低いPb-50%Snはんだを選択した。

Fig. 1に、Cuと異種材の加圧はんだ付試験片形状を示す。試験片の継手部で加圧はんだ付する前に、まず230°C、20s間の予備はんだ付を行った。これは母材とはんだ界面に合金層を形成させるためである。このときのはんだ付は、大気中のホットプレート板上で、フラックスを用いて差しはんだではんだ付し、230°Cで20s保持後に水冷した。予備はんだ付を終えた継手を、Fig. 2に示す方法で加圧はんだ付した。

すなわち、予備はんだ付した試験片を両電極間に挟み、電極間に通電、加圧してはんだを再熔融させ、低融点のはんだを排出し、接合した。通電抵抗加熱装置による加圧はんだ付条件を、Table 2に示す。通電電流は加圧はんだ付可能な0.5~1.7kAの範囲(材料によって異なる)とし、加圧力は45N(応力換算で30MPaに相当)で行った。また、加圧はんだ付と比較するために、はんだを用いない、いわゆる直接接合した継手も作製し、試験した。

Table 1 Copper and dissimilar materials.

Materials	Dimension	Composition (mass%)
Cu coil	φ 0.8mm	Cu>99.9%
Cu plate	0.6t	Cu>99.9%
BsP plate	1.0t	Cu-40%Zn
Ni plate	0.2t	Ni>99.9%
Fe-42Ni plate	0.25t	Fe-40%Ni -0.5%Mn

Fig. 1 Dimension of specimen for tensile testing (unit: mm).

Table 2 Condition of press-soldering.

Current	Time	Pressure	Electrode
0.5~1.7kA	0.4s	45N (30MPa)	Mo

Fig. 2 Procedure of press-soldering.

なお、直接接合は、母材の組合せによって適正電流値が異なることから、今回ははんだ供給の有無での強度評価を比較するために、加圧はんだ付で最大の破断荷重を示した電流値で行った。

夫々の接合部は研摩及び腐食後、光学顕微鏡並びにSEMで観察し、成分分析にはEPMA(日立製S-800)を用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 異種材継手と電気抵抗の関係

Fig. 3に電気抵抗に及ぼす通電電流の影響を示す。電気抵抗は図中に示すように、継手部中心の長さ35mmについて、通電電流1Aで測定した。縦軸の電気抵抗率の算出は、図中に示すように断面積は $S_1 + S_2/2$ で計算した。横軸は加圧はんだ付時の通電電流値である。

黒塗で表す材料自身の電気抵抗は、Cuを除いて継手より幾分高い値を示す。継手の電気抵抗率は材料自身の抵抗と対応しており、高い方からFe-42Ni, BsP, Ni及びCuの順序になる。なお、Ni系のFe-42NiとNi継手とは $4.8 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} \sim 1.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ の範囲にある。この値は夫々の固有抵抗値より僅かに低くなっている。Cu

Fig. 3 Effect of current on electrical resistivity of dissimilar joints.

系のBsPとCu継手にも大きな差はなく、 $3.8 \sim 5.8 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ である。BsPの場合は材料自身の固有抵抗より僅かに低い抵抗を示す。一方、Cuの継手は固有抵抗よりやや大きい値を示す。

通電電流を変えることにより合金層厚さ及び合金層成分が異なり、電気抵抗も違って来るものと推定したが、電流の影響はほとんどない。つまり加圧はんだ付時の通電電流によって生じる合金層厚さ等の変化は、接続抵抗に余り影響を及ぼさないことが分かる。

以上のようにFe-42Ni、Ni並びにBsPの継手の抵抗は材料自身の電気抵抗よりわずかに低く、Cu継手の場合は逆に高い。Cu継手の場合、加圧はんだ付で形成された合金層により高くなっているものと考えられる。

3.2 接合強さに及ぼす通電電流の影響

Fig. 4に引張破断荷重に及ぼす通電電流の影響を示す。はんだは全てPb-50% Snを用いた。横軸の電流値は加圧はんだ付時の通電電流である。図中の白抜きは接合部から、黒塗は母材から破断したことを示す。△印の値ははんだを用いていない、いわゆる直接接合したときの継手強度を示す。図に示すように、Fe-42Ni、Ni、BsPそしてCuと材料自身の固有抵抗値が低くなる順に、母材破断となるのに必要な通電電流値は高くなっている。いずれの組合せにおいても、適正な通電電流値を選べばCu母材から破断し、加圧はんだ付の接合強度ははんだを用いない直接接合継手より強いことが分かる。なお適正な電流範囲は、Fe-42Niでは0.8~0.9 kA、Niでは1.1~1.3 kA、BsPでは1.25~1.5 kA、そしてCu継手の場合は1.35~1.65 kAである。BsPとCu継手に関して適正電流値以上の実験を行わなかったのは、これ以上では母材が軟化して引張強度が低下するものと判断したためである。

この適正電流範囲は、Fe-42Niが±5.8%と最も狭く、次がNiで±8.3%、Cu系の方がやや広くBsPが±9%、Cuが±10%である。

このようにNi系の母材の適正な通電電流の範囲が狭い。すなわち、Ni系では加圧はんだ付継手の作製は、Cu系に比べると接合条件範囲が狭く難しいと言える。

Fig. 4 Effect of current on tensile shear load.

これらの異種材料継手の加圧はんだ付時の加熱温度をサーモレーサーにより測定した結果、およそ適正な電流範囲で500°Cを示し、過電流でそれ以上、過小電流の場合でそれ以下の温度であった。

したがって、適正值以上の電流になると、接合部が過熱されてCu線の変形や反応が大きくなり、母材破断でありながら破断荷重が低下する。低い場合は、逆に加熱不足のため反応が少なく、破断荷重も低くなると考えられる。

一方、はんだを用いないで加圧はんだ付時の最適電流値で直接接合した場合は、全て母材破断に達しない。また、Ni系の方が破断荷重が80~100 Nと高く、Cu系は35~65 Nと低い。その原因には材料自身の固有抵抗値や熱伝導度が影響し、抵抗の大きい、熱伝導度の悪い材料程加熱され接合部の反応が促進された結果、破断荷重が高くなっているものと思われる。母材の直接接合についてはCu系継手の方が強度の低下が大きいため、接合条件を変化させて検討する必要がある。

以上の結果から、Cuと異種材継手に対しても、加圧はんだ付により高強度の接合が得られることが分かった。

3.3 接合部の顕微鏡組織

Fig. 5にCuと異種材間のはんだ付部の顕微鏡組織を示す。接合部の通電電流が小さく接合部破断した場合、適正電流で接合して母材破断した場合（良好と呼ぶ）、並びに、過電流となり、母材が劣化して母材破断した場合（過電流と呼ぶ）の3種について観察した。

図中に示すように、接合部には加圧はんだ付によって合金層が形成されている。合金層厚さに差違が見られるが、薄いのは、合金層を形成しない未反応なPb、Snが加圧はんだ付により排出されたためである。Cu系では、BsPが接合部の反応が著しい。良好及び過電流で母材破断したものではBsP材への熱の影響が大きい。Ni系で

Fig. 5 Microstructure of joints.

はFe-42Niの方が反応が著しく、過電流のものはFe-42Ni板にクラックが発生している。いずれの継手も、過電流で接合したものは母材の損傷が大きく、接合条件には十分に注意することが重要である。

加圧はんだ付部の合金層組成を明らかにするために、日立製のSEM, S-800EDX (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) により定量分析した。

Cu継手の場合は前述 (Fig. 5の結果) したように、電流の増加に伴って合金層が薄くなっている。接合部破断の試料では20%のSnが含まれるが、良好で8%、過電流になると4%とSnが少なくなり、減少した分Cuが多くなっている。今回の実験で、例えば加圧はんだ付のときに、500°Cに加熱されて急冷されたと仮定すれば、Cu-Sn 2元状態図^{5,6)}から、Snが20%の場合Cu(α)と δ 相が存在し、8%の場合Cu(α)相が、そして4%の場合もCu(α)相が存在すると考えられる。Cu(α)相に近づけば近づく程、合金層の耐熱性や強度等の特性上からも好ましく、この点から考えて、Cu継手の合金層は組織上優れて

いると言える。

BsPの場合、合金層はCu-Sn-Znの3成分から成る。Snは電流の増加とともに減少し、過電流ではSnは検出されない。Snの減少した分Znが多く含有される。良好な母材破断の接合層はCu-25%Zn-3%Sn組成を示す。Ni継手の合金層はCu-Sn-Niから成り、接合部破断と良好な母材破断の場合にはSnが約25%と多く、過電流の場合2%と急激に少なくなる。良好な接合層はCu-40%Ni-26%Snからなる。Fe-42Niでは合金層Cu-Sn-Feから成り、接合部破断で17%含有されるSnが、良好で15%、過電流で9%となる。Cu成分は電流の増加に従って多くなっており、Cuの溶込みが著しい。過電流の場合、合金層は非常に広い層となっている。良好な接合層はCu-6%Fe-4%Ni-15%Snの組成から成る。

以上の結果から、Snが検出されるものは加圧はんだ付によって形成された合金層であると考えられる。母材の種類により異なるが、2元、3元並びに4元の合金層を形成して、接合強度が向上し、更には耐熱性も高くなっ

ているものと思われる。夫々の継手の適正電流値で形成された前述の組成を基に、その融点(固相線)を状態図^{5,6)}から推定した。おおよそCuの場合850°C, BsPの場合850°C, Niの場合800°C, 並びにFe-42Niの場合800°Cと予想される。

すなわち、本実験のCuと異種材との接合には加圧はんだ付が適用でき、加圧はんだ付により特有の合金層が形成され、強度及び高温強度(後述)が普通のはんだ付に対して一段と向上することが分った。なお、はんだ成分中のPbは母材と反応しないため、加圧時に排出されて合金層には検出されなかった。

3.4 合金層厚さと通電電流の関係

加圧はんだ付においては、はんだ中の反応元素と母材が反応して形成した合金層で接合されている。このため、合金層の組成と厚さは、接合部の特性を左右する重要な因子である。

Fig. 6に異種材継手の合金層厚さに及ぼす通電電流の影響を示す。いずれの継手も、通電電流が増加すると合金層は薄くなる。加熱により低融点のはんだ成分や合金層が排出され易くなるためであろう。特徴的なことは、Ni系とCu系の材料の違いが顕著なことである。Ni系が薄く、Cu系の方が合金層は厚い。母材破断した適正な電流値のときの合金層厚さは、Fe-42Niが1.4 μm , Niが1.05 μm , BsPが1.8 μm 及びCuが2.2 μm であった。この違いは、Ni系とPb-50% Snはんだとの反応がCu系と比較すると遅いことが原因と考えられる。これまでの検討結果から¹⁻⁴⁾、はんだ中のPbとCuとは反応せず、Snが反応に寄与することが分かっているの、拡散元素をSnに限定した場合のCu及びNi中のSnの拡散係数Dを、(1)式を用いて計算した。

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

D_0 : 振動数項, Q : 活性化エネルギー, R : 気体定数, T : 絶対温度

D_0 と Q は文献⁷⁾により、加圧はんだ付温度500°Cで計算すると、Cu基板場合 $D = 2.05 \times 10^{-14}$ (cm^2/s), Ni基板の場合 $D = 8.90 \times 10^{-18}$ (cm^2/s)の値が得られる。この結果からもSn拡散はCuに対して早く、Niに対しては遅いため合金層厚に差が生じることが分かる。

3.5 異種材継手の温度依存性

室温の引張試験で母材破断を示した接合条件で作製した試験片を用い、温度依存性を調べた。Fig. 7に強度の温度依存性の結果を示す。図より明かなように、加圧はんだ付試料の強度は従来のはんだ付よりも大幅に大きく、特に室温以上で著しく大きいことが特徴である。なお、150°C、250°Cと高温になるに従って強度が若干低下するのは、破断箇所がいずれもCuであることから、Cu自身が軟化するためである。

強度的にNi系の材料にはややばらつきがあるが、Cu系の材料は安定した強度を有する。Cu材の場合はこれまでの結果^{3,4)}と同様に全て母材破断である。このように高い強度を有するのは、加圧はんだ付によって形成された合金層が、前述したように耐熱性のある成分になっていることを意味している。

一方、はんだ付のままの継手は、室温及び100°Cでの強度とも加圧はんだ付のものに比べると著しく低いことが分かる。これは接合部に低融点で低強度のはんだ層が残存しているためである。

Fig. 6 Effects of current on thickness of alloyed layer.

Fig. 7 Effect of testing temperature on tensile shear load at dissimilar joints.

4. 結 言

加圧はんだ付の適用拡大を図るため、Cuと異種材: Fe-42Ni, Ni, BsP及びCuとの組合せを対象に加圧はんだ付を行い、接合部の接統抵抗、引張強さ並びに合金層組成等を検討した結果、次の事項が明らかになった。

(1) いずれの組合せの場合にも、はんだを用いない直接接合に比べ高い接合強度が得られる。

その接合強度は、室温から250°Cの範囲において、母材破断強度と同程度である。

(2) 接合部の接統抵抗は、Fe-42Ni, Ni及びBsP継手とも夫々の母材の固有抵抗値より僅かに低いが、Cu継手は逆に銅の固有抵抗より高い抵抗を示す。

(3) 加圧はんだ付により接合部に合金層が形成される。その厚さは、約Fe-42Niが1.4 μm , Niが1.05 μm , BsPが1.8 μm 及びCuが2.2 μm であり、その融点は800~850°Cと推定される。

(4) 本実験の試験片において、良好な母材破断となる通電電流範囲(加圧30 MPa, 通電時間0.4 s)は、Fe-42Niが0.8~0.9 kA, Niが1.1~1.3 kA, BsPが1.25~1.5 kA, 及びCuが1.35~1.65 kAであり、Ni系はCu系に比べて適正電流範囲が狭い傾向にある。また、この時の