アルミニウム極薄板の高速 TIG 溶接に関する研究*

浮田 静雄**, 赤松 泰輔***, 清水寛一郎**

The Welding Conditions of very Thin Aluminum Sheet of High Welding Speed DCEN TIG Welding without Filler Metal*

by Shizuo Ukita**, Taisuke Akamatsu*** and Kan-ichirou Shimizu**

The method of butt welding of very thin 0.3 mm thick aluminum sheets at very high welding speed (6000 mm/min) using ordinary TIG welder were newly developed. The process are as follows.

Polarity is DCEN. The aluminum sheets were put in between 30 mm thick copper plates. By this method the aluminum sheets were butt welded up to 0.2 mm and bead welded up to 0.1 mm thick by bead on plate successfully. At comparatively low welding speed (500 mm/min), pushing roller had better to be added.

Generally, welding heat input at high welding speeds are smaller than those of low welding speed. The appearance of successful welding are shown in photographs.

Key Words: TIG, Butt Welding, High welding speed, Thin Al sheet, DCEN, Weld heat input, Copper clamp

1. 緒 言

近年、TIG 溶接法は確実にその用途を拡大しているが、アルミニウム板の需要の増大に伴ってそれへの適用もまた重要な位置を占めてきている¹⁾。アルミニウム板の中でも、0.3 mm 以下の極薄板は薬品容器、飲料缶、熱交換用材などに用いられ需要が多いが、後述するように突き合わせ溶接が困難であり、通常の TIG 溶接機による溶接適用化が可能であればこの分野で活用されると思われる。同時に、一方では高能率化に直結する溶接速度の増大化もまた求められてきている。

従来、溶接速度の高速化に関しては、小倉ら²⁾はアルミニウム薄板の片面突き合わせ TIG 溶接で、通常の 1 電極では溶接速度が 1000 mm/min までであるのに対し、これを 2 電極を用いることによって 2000 mm/min まで可能になったと報告している。また、中西ら³⁾は TIG に高周波パルスを適用させ板厚 0.5 mm のアルミニウム薄板の突き合わせ溶接で 4500 mm/min の溶接速度の例を報告している。一方、アルミニウム極薄板の溶接例に関しては、前述の中西らの報告の他、長坂ら⁴⁾は最近のガスシールドアーク溶接機の解説の中で、ダブルインバータ制御を TIG に適用する方式で 0.4 mm のアルミニウムの突き合わせ溶接が可能になってきたと述べている。しかしながら通常の TIG 溶接機で厚さ 0.3 mm 以下のアルミニウム極薄板を 6000 mm/min の高速で突き合わせ溶接した報告例は見受けられない。

アルミニウム極薄板の片面突き合わせ溶接を行う場合、それが有する物理的性質が鉄鋼やステンレス材のそれと大きく異なる点があって、通常の TIG 溶接法そのままではまれにビードオンプレートで裏波が得られる場合であっても実際の突き合わせ溶接では極めて施工が困難である。これは、一般には純タングステン電極を用い、交流で溶接するためその直径を太くせざるを得ず、アークを集中させるににくいことと、母材のアルミニウムは熱伝

導率及び熱膨張係数が他の材料に比べて大きいこと母材溶接部周辺がアークによって加熱されて溶接前にひずみ変形を生じ、溶接速度を早めるとアークそのものが不安定になってくることが原因と考えられる。

そこで極性を DCEN とし、電極としてトリウム入りタングステンの細直径のものを用いてアークが拡がらないようにし、さらに母材変形の原因となる熱が未溶接領域に先行流入しないように母材を厚手の 2 枚の銅板で、サンドイッチ状に挟みこむ方法で TIG 溶接を行うとともに溶接速度が低速の場合には、溶接線をトーチに先導させた押さえローラで母材の浮き上がりを押さえる。この方式を用いて実験を行った結果、この方法がアルミニウム極薄板の突き合わせ TIG 溶接に有効であり、また溶接速度も 6000 mm/min の高速化が可能であることが分かった。

2. 実験方法

実験に用いた材料は、Table 1 に示す成分の工業用純アルミニウム A1100P で、板厚は 0.3~0.1 mm である。溶接機はサイリスタ制御の TIG 溶接機でトーチのカップ内径は 6 mm を用いた。電極は直径 1 mm の 2% Th-W で、先端を 0.5 mm R の半球状とした。

Fig. 1 (a), (b) は実験装置で、走行台車上の溶接台に厚さ 3 mm の銅板 C_2 を裏あてとして敷き、その上に $30 \times 400 \times 0.3$ (~0.1) mm のアルミニウム母材 M を 2 枚突き合わせて置き、さらにその母材を厚さ 30 mm、端面 30 度のテーパをもつ一對の銅製板 C_1 でクランプした。つまりアルミニウム母材をその 10 倍の厚みの銅板でサンドイッチ状に密着して挟み込む。トーチは母材と垂直の下向き溶接で溶加棒は使用しない。溶接速度が比較的低速の場合には、熱ひずみで母材が浮き上がるのを防ぐために溶接線上のアークの前方母材面を、ローラ R で押さえつつ溶接を行った。トーチは常に固定したままで母材側を走行させるが、その速度 V (溶接速度) は 500~6000 mm/min である。電極と母材間の距離は 1.0~1.5 mm、シールドガス Ar の流量は 5~10 l/min とした。なお特に断らない限り母材表面はアセトンで実験直前に脱脂処理をほどこしたのみで行った。

*原稿受付 平成 5 年 1 月 6 日 昭和 60 年度春季全国大会で発表

**正 員 工学院大学 Member, Kogakuin University

*** 工学院大学 Kogakuin University

Table 1 Chemical compositions of base metal.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.12	0.51	0.11	0.01	T.R.	T.R.	0.01	0.03	99.21

Fig. 1 Schematic view and photograph of very thin Al sheet butt welding apparatus.

3. 実験結果及び考察

突き合わせ片面溶接を行う前にビードオンプレートで溶接してその可能性を調べた。溶接条件としては、溶接電流、溶接速度、カップの内径とガス流量、電極と母材間距離、電極の種類とその先端形状、板厚、クランプの対向間距離などが関係するが、これらを適宜かえることにより溶接ビードが連続してできているか、同時に裏波が生成されているかどうかを判定の基準として溶接の可能性を推定した。

Fig. 2(a)~(d)はその結果で、溶接速度が6000 mm/min、電極母材間距離1.2 mm、アルゴンガス流量7 l/min、極性は棒マイナスのDCEN、電極 Th-W の直径は1 mm、板厚0.3 mm の条件のもとで、溶接電流を変化させて行ったビードオンプレートによるビード表面状態である。各(a), (b)は電流が30 A で比較的低い場合である。両者は同一試料であってビードの長さ約300 mm の中でスポット(痕跡)からなる不連続領域(a)と、ビードが均一ではないが連続している領域(b)とが混在しており、ときには不連続領域のみ、あるいは連続領域のみの場合もある。いわばこの電流値がこの場合の臨界値であり、溶接速度の減少あるいは電流値の増加に伴って不連続点はその間隔が縮小し消滅していく。スポット部は中心の窪みが大きく周辺隆起の形状から推定すると一定の時間陽極点が固定されており、その間電極側が相対移動しているゆえアークが引きずられアーク長が長くなる。アーク長が伸びると陽極点は次の新しい未溶融部に瞬間的に移行し、前の溶融池は入熱を失って急冷し前述の形状を形成するものと考えられる。

溶接電流を順次増加させると溶融池前面溶融部が大きくなりスポット状態は消滅し、やがて(c)のような波形の連続ビードが生成されるようになる。電流値をさらに上げていくと(d)のようにビードの表面は波が不規則になり

Fig. 2 Photographs of welded surfaces by conditions of bead on plate under welding speed 6000 mm/min; (a), (b) insufficient current, DCEN 30 A, 11 V, (c) adequate current, DCEN 55 A, 11 V, (d) excessive currents, DCEN 75 A, 11 V.

穴が開くようになる。電流値が高いと溶融池の幅も広くなるが、板厚が非常に薄いのでアークの強い吹きつけとゆれによって底の浅い溶融池は表面張力による結合力が破られいわゆるガウジング状態又は穴あき状態に至る。

ビードオンプレートによる試行結果を参考に板厚0.3 mm の突き合わせ片面溶接をアルゴンガス10 l/min、設定アーク長(電極-母材間距離) $L=1.2$ mm で行った。Fig. 3 にその結果を示す。○印を結ぶ2曲線が溶接可能な適正電流の上、下限であり、溶接速度が増すにつれて電流値も上昇するが、同時に溶接可能な電流範囲も広がる。Fig. 4(a)~(c)は溶接速度を変えた場合の突き合わせ溶接のビードであるが、例えば、溶接速度を上昇させていくと(c)に見られるように突き合わせ面上に褐色の線が生じる場合がある。母材表面及び突き合わせ面は溶接直前にアセトンで拭拭し、清浄を保ってあるので空気の混入による酸化物の生成あるいは母材内不純物が溶融浮上した結果かと思われる。そこで5~6秒間、Arを事前に放流しておいてそのままアークを点じると前述の着色ラインは消える。これで原因は前者によるものと知れる。事前の被包ガス放流によってトーチ内の残留気体、湿度などが追い出されると同時に一端形成されたガスの定常流はアークの発生によって大きく変ることなく溶融部をシールドするものと思われる。この酸化物は表面だけであって、サンドペーパーで削除できるほどの浅い浸蝕である。

Fig. 3 Successful welding current range at various welding speed.

Fig. 4 The effect of welding speed at butt welding of Al sheet on bead appearance (sheet thickness 0.3 mm, DCEN, $L=1.2$ mm); (a) $V=1500$ mm/min, 24 A, 9 V, (b) $V=3000$ mm/min, 30 A, 9 V, (c) $V=6000$ mm/min, 50 A, 10 V.

また、高速溶接時には、例えばガス流量が $1 \sim 2$ l/min の変動差で突然溶接が全く不可能になることがある。その臨界値はまた他の条件、例えばカップ形状、電極の突き出し長さや先端の形状、電極と母材間距離、板厚、クランプのための押え板の位置、更には大気中の湿度までもがかなり小なり相互に関係しているようで、正確なデータを持たないが定性的にはおよその傾向が知れる。そのうちの 1 例として Fig. 5 は各溶接速度のもとでクランプ C_1 の対向間隔 W を変え、板厚 0.3 mm の突き合わせ溶接が可能な範囲を調べた結果で、溶接条件を数種変え

Fig. 5 Relation of gap of clamps W and successful welding range at various welding speed.

てその中で溶接できたものを○とした。したがってこの範囲外(斜線部)は溶接の可能性の見込みがないと思われる領域である。間隔 W をせばめていくとクランプ C_1 の端部にアークが移行して溶接ができない。この限界が $W=4$ mm 前後で鎖線 AA で示す。この限界の間隔 W はビード幅の約 2 倍前後である。逆に間隔 W を広げていくと板の突き合わせ部分が溶接中に反り上がって電極端と短絡する。

母材アルミニウムは鋼に比較して熱伝導率及び比熱が非常に高く局部に大きな入熱を必要とするが、一方、その熱が母材中を伝導して未溶接部分まで加熱し、板を变形に導く。アルミニウムはまた線膨張係数も大きいいため变形も著しく板厚が薄くなればさらに顕著となる。このため実験方法で述べた通り 2 枚の厚手銅板で母材 M を密着固定して熱の吸収をはかるが、特に C_1 の密着面積は大きいほど望ましい。また Ar ガス流を妨げるかアークが短絡しない限り間隔 W は短い方が望ましいので当報告内の実験は全て $W=5$ mm に統一した。ここで母材の銅板への密着率を高める一工夫として、溶接線と反対側の端部でクランプ C_1 と母材の間に厚さ 0.1 mm 程度の狭幅の Cu 板をはさみこませ、 C_1 、 C_2 をしめつけるとよいことが分かった。

なお、500~1000 mm/min の低速度の溶接の場合は押えローラを併用しているがこの押えローラは高速溶接の場合には震動を発生させ、あるいは板表面を傷つける場合があり、さらに後述するように板の突き合せ面の盛り上がりも少ないので高速溶接では使用しない。

Fig. 6 は対向間隔 W を一定にしたクランプ C_1 によって拘束されたアルミニウム板の突き合わせ部形状を溶接終了後の試験片をもとに推定したものである。(a)においてアークの熱源は中央溶接線を紙面の裏側から表側へと垂直方向に拡がりつつ移動しているものとする。(b)は加熱前または加熱しても変形せずその相応分だけ内部圧縮応力がたかめられている場合で、(c)~(h)は突き合わせ部が溶融前で加熱され変形を受けている状態である。前者の場合には板の伸展を考慮して設定時に突き合わせ面の間隔を微少でもあけておくと、かえって穴あき、片溶け現象が生じて溶接できなくなる。特に高速溶接の場合に著しい。これは溶接線が途中でずれて(またはアークが

Fig. 6 Various types of sheet deformation at butt welding.

溶接線からずれて) 表面張力釣り合いがくずれたために起こったものと思われる。この場合は逆に突き合わせ面を押しつけるように密着固定させた方が良結果をもたらす。この場合には(c), (d)の2山形と(e), (f)の1山形になる。この状態でアークが通過すると(k)ようになる。

供試材の端面処理が適切でないと(g), (h)のように突き合わせ部の重疊が生じるが(h)の形状でも溶融前には(g)のように変わる。(i), (j)は端部にバリが生じている材料をそのバリを突き合わせて試みたもので結果はあまりよくない。

この中で多く見られる形状は(b)が(f)の状態に移行するので約8割がこれに該当する。溶接速度が遅い場合で溶融前に突き合わせ面が充分加熱され盛り上がりが大きくなっているとアーク長が短くなり電極が母材に接触することがある。溶接後の裏波を見ると溶融池が押されて波がつぶれたような形状と、裏あてに接触しなかったのか規則的な裏波形が見える場合がある。

薄板裏波の形状については西口、黄地ら⁵⁾が熱伝導論をもとに検討しており、暮石⁶⁾は裏波ビードの出かたを支配する主要なパラメータが平均ビード幅とビード断面であることを示している。前述の裏波の観察結果からアルミニウムの極薄板の場合は板厚方向の重力の影響は小さく溶融池内ではアークの吹き付け力と界面張力が互いにバランスを保ち、これらが裏なみビード生成の主要因ではないかと思われる。前者の力が強い場合には溶液の表面張力の結合力がくずれて穴が開き一度開いた穴は、溶融面が広い割には厚みが極端に薄いので新たな溶融金属で充填されない限り元状復帰は困難となる。

Fig. 7 は各溶接速度とビード中心部の盛り上がり高さとの関係であって溶接速度が増すと盛り上がり高さは減少する。したがって溶接速度が早いほど電極と母材との接触がなく安定アークが作られるとも考えられるが実際にはアークは引きずり現象を生じてアーク長が長くなり同時に揺動が加わりアークは不安定になる。

溶接速度を増していくと前述の Fig. 4 で見られた通りビードの波は粗くなり、緩やかな曲率から鋭い矢形に変る。電極母材間距離を伸ばせば、その割合で実際のアークも比例して伸ばされ、ますます不安定になって持続できなくなる。この電極-母材間距離 L の限界は Fig. 8 のプロットを結ぶ2曲線で囲まれた領域で示す。

溶接速度を上げると、低い場合に比較してアークの熱

Fig. 7 The height from the base metal surface level to the bead surface level on the welding line.

Fig. 8 Relation of the shortest distance from the electrode tip to the base metal L and successful welding range at various welding speeds.

Fig. 9 Relation of welding heat input and width of welded beads.

Fig. 10 Photographs of the welded beads of surface and back side of 0.2 mm thick Al sheet (a) (b), and of the welded bead of 0.1 mm thick Al sheet (c) by bead on plate process.

は拡散よりも溶融に使われる割合が増してくる。Fig. 9は溶接入熱とビード幅との関係であって、仮に同一のビード幅を生成させるには溶接速度の大きい方が溶接入熱が少なくてすむ。

さて、厚さ0.3 mmの極薄板を2枚の銅板でサンドイッチ状に挟持し熱の母材上での拡散を防ぐことによってDCENで高速突き合わせ溶接することができたが板厚を更に薄くした場合、どの程度この方法で溶接可能かを試みた。

Fig. 10 (a), (b)は厚さ0.2 mmの突き合わせ溶接の結果で(a)はビード表面、(b)は裏波で溶接電流は30 A、溶接速度6000 mm/min、アーク電圧9 Vの場合の成功例である。上記以外の条件では非常に難しく成功に至らなかったが、これは板厚が0.2 mmと極端に薄いため、突き合わせ面のくいちがいはわずかな熱変形でも大きな影響を受け、板厚に比してビード幅が7倍も広いので、前述のアークの揺動、不安定吹付けによって溶融池表面の均衡が破れて穴があき、その穴は埋まらなくなるためと考えられる。

以上このことから通常のTIG溶接を用いてのアルミニウムの突き合わせ高速片面溶接は溶接速度6000 mm/minまでは厚さ0.2 mmのものが限界であろうと思われる。但し、ビードオンプレートの状態ではFig. 10 (c)で示す通り厚さ0.1 mmの材料でも可能と思われる。これは、例えばアークが溶接線をはずれても突き合わせ面が存在しないので片側溶融が生じないなどの理由であろう。

4. 結 論

通常のTIG溶接機を用いてアルミニウム極薄板を高速で片面突き合わせ溶接する方法を開発した。この方法を用いて実験を行った結果、次のような結論を得た。

(1) 直径1 mmのトリウム入りタングステン電極を用い、極性をDCENにしてアークを集中、安定化させ、さらに母材溶接部周辺がアークによって加熱され、ひずみ変形を生じないように2枚の厚手の銅板でアルミニウム母材をサンドイッチ状に挟みこむ手法で片面突き合わせTIG溶接を行った結果、0.3 mmの極薄板を溶接速度6000 mm/minの高速での溶接が可能となりこの方法がアルミニウム極薄板の突き合わせTIG溶接に有効であることが明らかになった。

(2) アルミニウムの片面TIG突き合わせ溶接での板厚の限界は従来は0.4 mmであったが、この方法によれば溶接速度6000 mm/min以内では0.2 mmが限界と考えられる。この理由は、この板厚では電流値が小さくアークが不安定になりやすいことに加えて、板厚の薄みに対して溶融池幅が非常に大きいため溶融金属の表面張力とアークの吹付力とのバランスが僅かな溶接条件の変動に対しても崩れてしまうことが原因と考えられる。

(3) アルミニウム突き合わせ面をクランプする銅板の対向間隔が溶接の可能性と関係しており、溶接入熱と突き合わせ面の変形、さらにそれらと溶接速度の増減による影響などの実験結果から、押え板の対向間隔はビード幅の約2倍が適当であることが分かった。

(4) 溶接速度が早い方が遅い方に比較して溶接に要する入熱が少なくてよい。

終わりに本研究に対し、有益なご教示を賜った大阪大学黄地尚義教授に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 山本：最近のガスシールドアーク溶接方法及と溶接機器の現状、溶接学会溶接法研究委員会並びにアーク物理研究委員会資料、88-685 (1988)。
- 2) 小倉、二瓶、芦田、小園、妹島：2電極スイッチングTIG溶接法による高速溶接、溶接学会アーク物理委員会資料、81-459 (1981)。
- 3) 中西、他：高周波パルスアーク溶接機の応用、神鋼電機、Vol. 27 No. 2 (1982)。
- 4) 長坂、寺山、山本：インパクター溶接機の進歩、溶接技術1987、2月号 (1987) 52-58。
- 5) 西口、黄地、中田、石橋：アーク溶接の溶融地現象に関する界面張力理論的解析 (第3報)、本誌論、2 (1984) 201。
- 6) 暮石：TIG溶接による裏波ビード形成主要因と溶接条件との相関性、溶学誌、49 (1980) 297。