溶接部温度モニタによる裏波ビード幅の制御システム*

～溶接部の溶込み制御に関する研究（第4報）～

小園 裕三**, 小倉 慧**, 小沼 昭***

Control System of Reverse Side Bead Width by Surface Temperature Monitoring of TIG Weld*

—Study on Penetration Control of Weld (Report 4)—

by Yuzoo Kozono**, Satoshi Kokura** and Akira Onuma***

An experimental model of a reverse side bead width control system which employs a fiber-optic thermal sensor and a microcomputer has been developed. The system is worked by monitoring infrared radiation emitted from the surface of the workpiece. In this system, infrared rays emitted from the surface of the weld are picked up and transmitted via optical fiber to a photodiode which converts them into electrical signals. The welding current is controlled by an 8-bit microcomputer in accordance with fluctuations in these signals so as to ensure the optimum surface temperature is obtained for a high quality reverse side bead.

Key Words: TIG welding, Temperature, Penetration, Back side bead, Automatic welding, Stainless steel, Tube, Monitoring

1. 緒 言

薄板の片面溶接，原子力配管の初層溶接，小径薄肉管の突合わせ円周溶接では均一な裏波ビードの形成が要求される。このような高品質を要求される個所のアーク溶接では TIG 溶接法を用いた自動化が進められている。自動化する場合の課題として溶接トーチ位置の制御に関するものと溶込みやビード形状などと直接関連する溶融状態の制御に関するものの2つに大別される。前者に関しては機械的あるいは光学的センサとマイコン等の組み合わせで高精度のトーチの位置制御が可能となってきた。しかし、後者においては溶融部に存在する高温、高輝度で、かつ不安定なアークのため溶融状態の計測、検出が困難で、種々検討は試みられているが、いまだ有効な手法は開発されていないのが現状である。溶接は熱エネルギーによる溶融・凝固現象であるから溶接部の溶込みや裏波ビード形状と密接に関連する因子として、溶接部近傍の温度が1つの有力な制御因子であると考えられる。このような観点から、前報^{1,2)}において、測定波長 $2\sim 3\mu\text{m}$ で溶接トーチに装着可能な小型の PbS 赤外放射温度計を製作し、低周波パルス溶接電流のベース電流時に温度検出を行えば、電極直下に近い点でもアーク光の影響を防止できると、薄板 TIG 溶接部の溶融プール後部の表面温度と裏波ビード幅の間には良好な相関性があることを明らかにした。そこで、本報告では溶融池後部の表面温度をパルス電流のベース電流時に検出してアーク光の影響を防止し、検出した温度が一定になるようにパルス電流のピーク電流を制御して片面溶接の裏波ビード幅を均一にする制御システムを試作したので報

告する。

2. 試作装置全体構成

Fig. 1 に試作した溶接部温度モニタによる裏波ビード幅の制御システムの概略構成を示す。本試作装置は小径管用で、小径管用の溶接ヘッド、溶接ヘッドに一体化された赤外線集光部、赤外線検出部、温度モニタ制御装置及び低周波パルス溶接電源より構成されている。溶接部後部からの放射赤外線を溶接ヘッドに一体化して取り付けられた赤外線集光ヘッドで集光し、単芯の光ファイバで伝送する。伝送された赤外線は赤外線検出部の赤外フィルタで透過波長領域が $2\sim 3\mu\text{m}$ に限定され、PbS 光導電セルへ入射する。ここで温度に比例する赤外線の量に応じた電気信号に変換、増幅される。なお、赤外線検出部には温度検出位置決め用の He-Ne レーザ発振器があり、赤外線検出用の光路を逆方向に用いて温度検出位置の位置決め及び赤外線集光ヘッドのレンズの焦点位置の調整に用いている。赤外線検出部からの温度信号はマイコンを用いた温度モニタ制御装置で処理され、溶融プール後部の温度があらかじめ設定した温度になるように溶接電流のピーク電流を制御する。温度信号の処理においては、温度検出時のアーク光の影響を防止するため、アーク光の輝度の小さいパルス電流のベース電流時の温度信号のみを用いて処理している。Fig. 2 に試作装置の外観写真を示す。Fig. 2 で(a)は温度モニタ制御装置、(b)は低周波パルス溶接電源、(c)は溶接ヘッド部である。なお赤外線集光ヘッドは溶接ヘッド部の中に、赤外線検出部は温度モニタ制御装置の中に組み込まれている。Fig. 3 に溶接ヘッド部の概略図を示す。被溶接管をクランプし、タングステン電極が管の回りを回転する。タングステン電極及び赤外線集光部はリング状ギヤに取り付けられ、リングギヤの回転はステッピングモータ及び数個のギヤ群で行なっている。

*原稿受付 昭和60年1月8日 昭和59年度春季全国大会で発表

**正 員 (株)日立製作所日立研究所 Member, Hitachi Ltd., Hitachi Research Laboratory

*** (株)日立製作所日立研究所 Hitachi Ltd., Hitachi Research Laboratory

Fig. 1 Schematic illustration of prototype small tube welding device using temperature monitoring of weld

Fig. 3 Photograph of prototype small tube welding device

Fig. 2 Welding head for small tube

3. 試作装置回路構

3.1 全体回路構成

Fig. 4 に試作装置の全体回路ブロック図を示す。図に示すように溶接電源の制御、温度信号の処理、溶接ヘッドの速度・位置制御、シールドガス弁の開閉、高周波アーク発生装置の制御等全てマイクロコンピュータにより処理し、温度モニタ制御装置のキーボード及び操作パネルから操作するようにしている。操作手順や操作状況及びインプットデータ等はCRT上に表示される。以下、主要な各ブロックについて説明する。

3.2 マイクロコンピュータ装置

Fig. 5 にマイクロコンピュータ装置及びその周辺ブロック図を示す。シングルボードコンピュータ (SBC) H68SBを中心にROM/RAMボード、アナログ・デジタル入出力ボードより構成した。これにより温度検出装置、パルス電流のスイッチング制御ユニット、リレーユニット、操作パネル、ステッピングモータ制御ユニットをそれぞれ制御している。

3.3 赤外線温度計測装置

Fig. 4 Circuit block diagram

Fig. 6 に赤外線温度検出装置ブロック図を示す。赤外線集光ヘッドの寸法は直径8mm×長さ15mmで、2個の石英凸レンズを組み込んだものである。測定点のスポット径は約0.5mmである。光ファイバは単芯のコア径200μmの石英系光ファイバ、赤外フィルタは2μm以上の赤外線を透過する赤外ロングパスフィルタであ

Fig. 5 MPU block diagram

Fig. 6 Schematic diagram of infrared pyrometer

る。検出素子は PbS 光導電セルを用いた。この検出系全体の波長透過特性は $2\sim 3\mu\text{m}$ の領域である。各光学部品の波長透過特性は前報²⁾で報告したものと同じであるので省略する。赤外線温度検出部からの信号は差動増幅回路で増幅し、温度信号を電圧信号として MPU に出力する。この時、PbS セルの零点補正用にダミーの PbS セルを用いて零点補正を行なっている。本検出装置の温度検出範囲は $600\sim 1600^\circ\text{C}$ である。

3.4 スイッチング回路及びスイッチング制御装置

溶接部の温度検出により溶接入熱を制御する本システムでは低周波のパルス溶接電流を用い、温度検出はアーク光の影響を防止するためパルス電流のベース電流時の中間で行い、入熱の制御はパルス電流のピーク電流の増減で行なう方式である。従ってパルス電流は立上り、立下りの良好な短形波とすること、及び電流値の高精度な制御が必要である。このため、パルス電流はスイッチング用のトランジスタ群より構成したスイッチング回路及びマイコンを用いたスイッチング制御回路により供給するようにした。

Fig. 7 にスイッチング回路及びスイッチング制御回路ブロック図を示す。スイッチング制御回路は MPU 装置から出力されるピーク電流 I_p 、ベース電流 I_B 、パルス周波数データ、デューティ・データ（デューティ＝

Fig. 7 Switching circuit and switching circuit controller block diagram

Fig. 8 Block diagram of stepping motor controller

ピーク電流時間

$$\frac{\text{ピーク電流時間}}{\text{ピーク電流時間} + \text{ベース電流時間}} \times 100\%$$
)によりパルス電流信号を作り、溶接電源のスイッチング回路へ出力する回路である。スイッチング回路部は直流電源からの直流電流を多数のスイッチング用トランジスタで、スイッチング制御回路からの指令によりスイッチング動作し、溶接ヘッドへパルス電流を供給するものである。

3.5 ステッピングモータ制御回路

Fig. 8 にステッピングモータ制御装置ブロック図を示す。溶接ヘッドの速度制御を行なう回路である。モータ制御回路は MPU からモータ動作命令に従ってステッピングモータを動作させる回路である。溶接速度範囲は $30\sim 300\text{ mm/min}$ である。また溶接トーチ位置の検出はステッピングモータへの印加パルス数のカウントによって行なっている。

4. 溶接部温度モニタによる溶接シーケンス

Fig. 9 に本システムの溶接部温度モニタによる溶接シーケンスを示す。Fig. 9 によりシーケンス動作を説明

Fig. 9 Welding sequence by temperature monitoring

する。操作パネルの溶接スタートの押しボタン操作により、Ar シールドガスが流れ、溶接電源の無負荷電圧が印加される。プリフロー時間 T_{pf} 経過後高周波アークスタートによりアーク発生する。 I_s はスタート電流で、 T_s 秒間で電流のアップスローブ動作を行ない、アップスローブ動作終了時点から溶接部の温度制御動作が開始する。設定温度 T_x に対し、検出温度 T_x' が一致するように溶接電流のピーク電流値 I_p を制御する。このとき、 T_x と T_x' の比較はパルス電流のベース電流期間の中間で1パルス毎に行ない、比較した結果 $T_x > T_x'$ ならばピーク電流値 I_p を次のピーク電流時に ΔI_p だけ増すようにしている。逆に $T_x < T_x'$ のときは $-\Delta I_p$ とする。このピーク電流の増減率 ΔI_p は 1 ~ 10 A/1パルスの範囲内で設定するようになっている。このような動作を繰り返して常に $T_x = T_x'$ となるようにして管円周を1回転溶接を行なう。ただし、本システムでは T_x と T_x' の差が $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内の時は $T_x = T_x'$ とみなすような制御を行なうようにしている。その後、電流のダウンスローブ動作を行ない、クレータ処理動作、シールドガスのアフターフロー動作 T_{df} を行なって一連の溶接シーケンスが終了する。

Fig. 10 にパルス溶接電流波形と温度信号波形の例を示す。試験片は外径 50 mm ϕ 、肉厚 2 mm t の SUS 管である。ピーク電流 $I_p = 75\text{ A}$ 、ベース電流 $I_B = 30\text{ A}$ 、パルス周波数 $f = 2.5\text{ Hz}$ のときで、温度検出位置は電極直下後方 $X = 3.5, 5, 7.5\text{ mm}$ の場合である。温度検出位置が $X = 3.5\text{ mm}$ と電極直下に近い場合、 I_p 期間で温度が上昇し、 I_B 期間で温度が下降し、温度信号の周期とパルス電流の周期とはほぼ一致していることがわかる。この時の温度差は約 35°C となっている。温度検出位置が

Fig. 10 Pulsed welding current and temperature signal

Fig. 11 Example of reverse side bead width using temperature control

$X = 5, 7.5\text{ mm}$ と電極直下からの距離が大きくなると I_p 時と I_B 時の温度差がほとんどなくなってくる。なお、Fig. 10 の場合、裏波ビードは形成されているが、裏波ビード幅は 1.0 ~ 1.5 mm と小さい時の条件である。

Fig. 11 に溶接結果の1例を示す。設定温度 $T = 1350^\circ\text{C}$ と 1400°C の時で、裏波ビード幅はそれぞれ $2.5 \pm 0.4\text{ mm}$ 、 $3.3 \pm 0.3\text{ mm}$ と均一な裏波ビードが得られていることがわかる。

5. 結 論

TIG 溶接部溶融プール後部の表面温度を検出し、検出温度が適正になるように入熱制御する溶接部温度モニタによる小径管 TIG 溶接装置を試作した。本試作装置の特徴は以下の通りである。

(1) 小径管溶接ヘッド、赤外線集光部及び検出部、温度モニタ制御装置、低周波パルス溶接電源より構成される溶接部温度モニタによる小径管溶接用の裏波制御システムを開発した。

(2) 温度制御方式は溶接部の温度検出をパルス電流のベース電流時に行ない、溶融池後部付近の検出温度が設定温度に一致するようにパルス電流のピーク電流を制御する方式である。

(3) 本システムを用いた SUS 小径管の溶接で、裏波ビード幅を均一に形成できることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 小園, 小倉, 梶原, 小沼: 軟鋼薄板 TIG 溶接部の表面温度と裏波ビード幅の関係, 溶学誌 Vol. 51, No. 3 (1982), 52~57
- 2) 小園, 小倉, 梶原, 小沼: SUS 薄板低周波パルス TIG 溶接部の表面温度と裏波ビード幅の関係, 溶学誌 Vol. 52, No. 1 (1983), 45~49
- 3) 荒田, 井上: アーク溶接の自動制御, 溶学誌 Vol. 41, No. 6, (1972), 44~45
- 4) 岡田: アーク溶接の自動化の現状と問題点, 日本機械学会誌 Vol. 82, No. 3 (1979), 264~269
- 5) C.J. Smith: Self-adaptive Control of Penetration in a Tungsten Gas Weld, Third-International Conference Promoted by TWI (1974-5)

超音波による電子ビーム溶接欠陥の インプロセスモニタリング*

—電子ビーム溶接の欠陥発生及び防止に関する研究 (第8報)—

岡村久宣**, 志田朝彦**, 佐々木莊二***, 木野裕敏, ***
松坂 稿**, 喜多久直****, 中崎隆光****,

In-Process Monitoring of Defect of Electron Beam Welding by Ultrasonic*

—A Study on Occurrence and Prevention of Defects of Electron Beam Welding (Report 8)—

by Hisanori Okamura**, Tomohiko Shida**, Soji Sasaki***, Hirotohi Kino***,
Takashi Matsuzaka**, Hisanao Kita**** and Takamitsu Nakazaki****

This paper reports the possibility of detecting bead deflection defects during electron beam welding (EBW) using in-process monitoring by ultrasonics. Experiments were conducted using a 6 kW (150 kV) high vacuum type welding machine and a 5 MHz ultrasonic transducer. All welding was performed at a 30 mm penetration depth in the flat position on SM41 steel plates. A coupling method of the ultrasonic transducer to the plate at a high temperature in the vacuum chamber was investigated. A 1 mm gap was maintained by using O-rings between the transducer and the steel plate surface and silicon oil was pumped into the gap for coupling and cooling.

The following points were concluded from the study.

- (1) It is possible to monitor the bead deflection during EBW by detecting the time difference between the ultrasonic echo from the weld metal and that from the groove face.
- (2) The detected voltage of the bead deflection is proportional to the measured bead deflection and the accuracy of detection is within $\pm 10\%$.
- (3) A bead deflection defect as small as 0.6 mm can be detected.
- (4) The maximum echo height from the weld metal is obtained using the following conditions:
 - (a) the measurement depth equals the maximum depth of penetration,
 - (b) the measurement distance is 15 mm behind the weld cavity.
- (5) The echoes from the weld metal are those arising from the root defects which occur at the bottom of the weld zone.

Key Words: Electron beam welding, In-Process monitoring, Bead deflection defect, Ultrasonic, Transducer, Echo

1. 緒 言

電子ビーム溶接 (以下 EBW と略す) の実用化に当り, 特に深溶込み溶接の場合には溶接ビードの先端が開先線から左右に外れるいわゆる目外れを生じ, 溶接されるべき部分に未溶着欠陥 (以下, 溶込み不足欠陥と區別

する意味で偏向欠陥と記す) を生じ易い欠点がある。従来, このような偏向欠陥の防止対策として, ITV による開先線の監視¹⁾, 差動トランスによる開先線の追尾²⁾, 2 次電子による開先線の検出³⁾, 電子ビームの走査によって生ずる X 線の強度分布からの開先線の検出⁴⁾ 等が検討され一部については実用化されている。しかし, これらの方法は, すべて電子ビームの中心と開先線を被溶接材の表面上で一致させる方法である。そのため, 被溶接材に残留磁界が存在する場合や溶接中に漂遊磁界が生ずる異種材料の溶接を行う場合, または被溶接材に水平不良がある場合は, 電子ビームの中心と開先線を被溶接材表面上で一致させても溶接ビードの先端部が開先線から外れ, 偏向欠陥を防止できないといった問題がある。

*原稿受付 昭和60年5月27日 昭和60年2月 第45回電子ビーム溶接研究委員会で発表

**正 員 日立製作所日立研究所 Member, Hitachi Ltd. Hitachi Research Laboratory

*** 日立製作所日立研究所 Hitachi Ltd. Hitachi Research Laboratory

****正 員 日立製作所日立工場 Member, Hitachi Ltd. Hitachi Work