横向きナローギャップ溶接の自動制御 (第1報)*

—適正溶接条件の設定とその自動選択方式—

荒田吉明**, 井上勝敬**, 柴田 泰***, 玉置光男***, 明石晴仁***

Automatic Control of Horizontal Narrow Gap Welding (Report 1)*

—Determination of correct Welding Condition and its automatic Setting Method—

by Yoshiaki Arata**, Katsunori Inoue**, Yutaka Shibata***,
Mitsuo Tamaoki*** and Haruhito Akashi***

The relation between welding conditions and the bead formation results are experimentally clarified and a method of the automatic setting of the suitable welding conditions by digital computer are discussed, on the horizontal narrow gap welding.

The main results obtained are as follows:

- 1) The formula by which weld bead height is given as the function of two parameters, that is, welding speed and current, was derived and its propriety was verified experimentally.
- 2) The experimentally obtained weld beads were divided into three classes on the basis of their configuration. They are evaluated by their flatness factor, smoothness factor and symmetry factor. The domain in which the bead situation is satisfactory was established in the three dimensional space of groove width, welding speed and welding current.
- 3) The method to set the suitable welding condition automatically by computer on considering the conclusions of (1) and (2) was proposed. The constant bead height and the satisfactory bead configuration will be obtained by adjusting welding speed and welding current according as the change of the root gap in this method.

1. 緒 言

ナローギャップ溶接は、開先はガス切断のままでよく開先加工が不要であること、及び I 型開先であるために、レ型、V 型開先などよりも溶着金属量が少量でよく、フィラワイヤの消費量が少ないなどの長所があり、近年、厚板溶接において注目されている。特に、横向きナローギャップ溶接は、構造物の現場組立時に有用で、一、二の研究がなされている¹⁾。この場合、アークの集中性、側壁への溶込み、たれ下りの防止などの点で、高いピーク値をもつパルス MIG 溶接が直流 MIG や従来のパルス MIG 溶接に比べて有利であると考えられる^{2,3)}。

しかし、同法の実用化例はいまだ少なく、適正な溶接条件も明確にされていない。また、一般に、アーク溶接

ではガス切断時や、組立時におこる寸法誤差のために、所要接合部の開先精度は保証されていない。特に、I 型開先ナローギャップ溶接では、開先幅の変動が溶接結果に影響を与えることが多い。

以上の観点から、著者らは、高いピーク値をもつパルス MIG 溶接による横向きナローギャップ溶接の適正溶接条件を把握すると共に、接合材の開先幅変化を自動検出し、その開先幅に対応して溶接条件を自動設定し、良好な溶接結果を得るような自動制御装置の開発を試みた。本論文においては、コンピュータ制御を前提として、溶接条件を自動設定する際の必要入力データの考察を溶接実験結果をもとに行っている。

2. 溶接実験の方法

高いピーク値をもつパルス MIG 溶接における、溶接条件と溶接結果の因果関係を知るため、以下の条件で溶接実験を行った。

軟鋼 SS 41, 16 (mm) 板厚の材に、1.2 (mm) 径の軟鋼用ソリッドワイヤで、Ar 80 (％), CO₂ 20 (％) の混合ガス 25 (l/min) をシールドガスとして、一層二パス

*原稿受付 昭和54年 5月 1日 (昭和53年度春季全国大会にて発表)

**正 員 大阪大学 溶接工学 研究所 Member, Welding Research Institute of Osaka University

***正 員 (株)片山鉄工所技術開発部 Member, Katayama Iron Works Ltd., Department of Research and Development

Fig. 1 Oscillogram of welding current and voltage in high peak pulsed welding.

の多層盛とした。トーチふり角は、下部溶接 -5° 、上部溶接 $+5^{\circ}$ で下、上の順である。電源として、パルス MIG 溶接機 (AIRCOMATIC Pulsed-Arc Power Source, AIRCO 社、出力電流平均 300 (A)、無負荷時ピーク電圧 72 (V)、ベース電圧 45 (V)) を用い、逆極性で使用した。本実験では、制御時の操作量を減らす目的で、パルス周波数を 120 Hz (交流電源周波数 60 Hz の場合)、溶接電圧をピーク 70 (V)、ベース 28 (V) で固定し、溶接電流 180 (A) ~ 280 (A)、溶接速度 10 ~ 85 (cm/min) を各々変化させた。溶接中の電流、電圧波形の一例を Fig. 1 に示す。この電流波形に見られるように、ピーク値はベース値の五倍以上に達しており、従来のパルス MIG に比べてピーク値は、はるかに大きいので著者らは「ハイピークパルス MIG 溶接」と呼ぶことにする。開先幅は 12 (mm) を標準として、 ± 3 (mm) の変化を考慮し、9, 12, 15 (mm) で種々条件下での溶接ビード形状を得た。

3. 溶接結果と各パラメータの定量化

開先幅が変化した場合、条件を変えることなく溶接を行うと、ビード高さは当然変化する。このビード高さをそろえるべく溶接条件を変化させると、ビードの表面形状が変化する場合があります、多層盛溶接には適切でない。この傾向は一層二パス溶接に顕著である。そこで、ビード高さを一定に保ち、かつビード表面形状も良好となる溶接条件の定量化を、実験データをもとに行った。この検討に際し、まず、開先幅変動がある場合にも安定に溶接が可能な溶接条件範囲を、各開先幅において初層ビードのビード外観、マクロ断面より求めている。以下の状態が出現した場合、安定溶接不可能としている。

1) 下側溶接を行った場合、一パスで開先全域が埋ってしまう状態

2) 上側溶接を行った場合、そのビードが極端にたれ下る状態

Fig. 2 Scheme to define bead height (h) when base metal is transformed.

3) 上側と下側ビードが分離する状態

以下の検討は、この安定溶接可能領域内で行っている。

3.1 ビード高さの定量化

Fig. 4 内の模式図に示すように、一層二パスの溶接を終えた段階で、ビード表面の起伏をならした高さをビード高さの実測値 h_{av} と定義する。このビード高さ (計算値を h と定義する) を与える式を次に導入する。

一層二パス分の単位時間当りの溶着金属量を V (mm^3/min)、溶接速度を v (mm/min) とすると、ビード横断面積 S (mm^2) は (1) 式で与えられる。

$$S = V/v \quad \dots\dots(1)$$

溶接中に生じる開先幅方向の変形量を ϵ (mm) とすると、 S は (2) 式として与えられる (Fig. 2 参)。

$$S = (W + W')h/2 \\ = Wh - \epsilon h^2/2d \quad \dots\dots(2)$$

W : 初期開先幅 W' : 変形後開先幅 h : ビード高さ d : 板厚

(1), (2) 式より S を消去整理すると (3) 式が得られる。

$$\epsilon h^2/2d - Wh + V/v = 0 \quad \dots\dots(3)$$

(3) 式を利用すると、ビード高さ h は開先幅 W を知れば、 ϵ , v , V をパラメータとして制御できることになる。ここで、変形量 ϵ と溶着金属量 V については、溶接条件、拘束状態で変化するものである。使用溶接条件範囲内で測定を行っておく必要がある。実験結果から、 ϵ は各種条件に対して 1 (mm) 程度であり、 $\epsilon = 1$ (mm) とする。 V は Fig. 3 のように溶接電流値で一義的に定まる。これは溶接前後の重量差をプロットしたもので、●印は下側溶接、×印は上側溶接を表す。板厚 d を 16 (mm) とし、(3) 式より $W = 9, 12, 15$ (mm) に対する各 h の値を各電流値について計算した結果の一例を Fig. 4 に実線で示す。計算値に対応する実測値 h_{av} を Fig. 4 にプロットして示す。このように計算値と実測値は良い一致を示している。したがって、開先幅

Fig. 3 Relation between welding current and weight of deposit metal.

Fig. 4 Relation between bead height and welding speed for various welding currents.
— calculated result (h)
• experimental result (h_{av})

情報を得れば, (3) 式を用いることにより, 与えられた溶接電流, 溶接速度, 板厚に対して, ビード高さの正確な推定が可能になる。開先幅の自動測定については, 別報で報告する。

3.2 側壁への溶込みの定量化

Fig. 5 の模式図の P_1 , P_2 値を側壁への溶込みと定義する。(P_1 , P_2)/2 の測定結果を Fig. 5 に示す。この量はアークねらい位置, アーク電圧に依存すると思われるので, 実験に際してはこれらを一定にするように注意を払った。この結果によると側壁への溶込みは, 溶接速度が大になると小さくなる傾向があるが, さほど顕著ではない。また, 溶接電流, 開先幅の影響も, はっきりと認められない。これらはハイピークパルス溶接の特徴の一つと考えられる。

Fig. 5 Relation between welding speed and penetration depth of side wall for various welding currents.

以上の事実から, 溶接条件に関係なく, ほぼ一定の側壁への溶込みが得られることが判明したので, これは制御対象として, 特に考慮しないことにする。

3.3 ビード表面形状の定量化

多層盛溶接においては, 下層ビードの表面形状が次層のビード形成に影響を与える。そこで, ビード表面形状について検討を行った。

次層の溶接を考えた場合, ビード表面形状が良好である条件を, 以下の三項目に要約する。これらの評価は多層盛溶接の実験において, 欠陥発生状況を整理した結果に基づいている。

- 1) 凹凸が少ないこと。(平坦性)
- 2) ビードと母材, ビードとビードの接触角が大きいこと。(ぬれ性)
- 3) ビードとビードの交わり方が対称に近いこと。(対称性)

各種溶接条件に対して, そのマクロ断面より上記三項目について評価し, ビード表面形状を分類し, 溶接電流と溶接速度で整理した結果を以下に示す。

3.3.1 平坦性

平坦性が良好であることは, 次層のビード形成に際し欠陥や融合不良発生の確率が低くなる。Fig. 6 にビード表面の平坦性を三段階に分類した結果を示すが, これ

Fig. 6 Classification of bead configuration by flatness factor.

Fig. 7 Classification of bead configuration by smoothness factor.

Fig. 8 Classification of bead configurations by symmetry factor.

は、図中の模式図にあるビード段差 d (mm) を測定し、 $d < 2$ を○、 $2 \leq d < 4$ を△、 $d \geq 4$ を×として分類したものである。傾向として、低電流、高速度域で平坦性の良いビードが得られている。○印より高速度領域の条件では、上下の溶接ビードが二つに分離する状態が生じ、前述した安定溶接可能領域よりはずれる。これは Fig. 7, 8 についても同様である。

3.3.2 めれ性

母材とビード、ビードとビードのもつ接触角は、溶融金属の流動に関係し、次層ビードの融合不良に大きな影響を与える。Fig. 7 内の模式図の角 θ_1 , θ_2 , θ_3 を測定し、鋭角が一つ以下のものを○、二つを△、三つを×として分類した。結果を Fig. 7 に示すが、低電流域でめれ性のよい結果が得られている。

3.3.3 対称性

この項目は、一層二パス方式の溶接を行なうときに必要なものである。溶接条件が変わることにより、上下ビードの重なり合う位置が変化するのは、次層のビード形成が変化することになり好条件とは言えない。また、最終ビードの外観からも対称性は必要である。そこで、Fig. 8 中の模式図に示した $a/a+c$ を測定し、 $a/a+c < 0.65$ を○、 $0.65 \leq a/a+c < 0.75$ を△、 $a/a+c \geq 0.75$ を×として分類した。結果を Fig. 8 に示す。高速度域で対称性の良いビードが得られている。

3.3.4 総合評価

平坦性、めれ性、対称性に関して、ビード表面形状の良否に関する分類が得られたが、これらを総合すると Fig. 9 が得られる。ここで、図中の記号は各点において、上から平坦性、めれ性、対称性を示している。開先幅 9 (mm) を例として示すが、同様の図を開先幅 12 (mm), 15 (mm) についても得ている。この図を用いると、総合的なビード表面形状の良否に関する、溶接速度、溶接電流空間の領域の分類が行える。そこで、平坦性が○、または平坦性が△でめれ性、対称性共に○の領域をビード表面形状良好領域と定義すると、この領域は各開先幅について、電流、速度空間の、ある閉領域として与えられる。この領域内で電流、速度を定めれば、健全なビード表面形状を得ることができる。

4. 最適溶接条件の自動選択方式

開先幅が変化した場合、同一のビード高さを保持し、ビード表面形状もほぼ同形で、良好な溶接を行える溶接条件の自動選択を、コンピュータ利用を前提として考察した結果を以下に示す。

(3) 式から得られる、開先幅が変化した場合にもビード高さを一定に保つ条件を、開先幅、溶接速度、溶接電

Fig. 9 Synthetic classification of bead configuration by flatness, smoothness and symmetry factors.

Fig. 10 Example of curved surface which express welding conditions that give constant bead height.

流で整理して Fig. 10 に示す。斜線部分はビード高さ h をそれぞれ 3, 6 (mm) に保つ条件の曲面を表わし、この曲面の間には $3 < h < 6$ 、その外部には $h < 3$, $h > 6$ (mm) なる種々ビード高さに対応する曲面群が存在することになる。

一方、前述のビード表面形状良好領域を同一の座標系で整理すると、Fig. 11 のようになる。Fig. 11 の立体が Fig. 10 の一つの曲面によって切り取られる断面は、ビード高さがある一定値にし、ビード表面形状も良好とする条件の曲面となる。この曲面を開先幅の座標軸へ投影したとき、その拡がりがある接合材の開先幅の変化範囲よりも大なる場合、その曲面を利用して、その接合材に対しては適正溶接条件が与えられる。また、小なる場合

Fig. 11 Three-dimensional domain of welding conditions that give the satisfactory bead configuration.

はそのビード高さでは、その接合材のすべての開先幅に対しては適正溶接条件が与えられず、Fig. 10 の曲面を変更し、ビード高さを変更する必要がある。Fig. 10 のいかなる曲面を利用しても接合材の開先幅変化を満足させる条件が与えられない場合、Fig. 11 の領域が小さすぎる、すなわち、3.3.4 項でのビード表面形状良好領域の定義が厳しいことになり、これを変更する必要がある。

すなわち、(3) 式とビード表面形状に関する領域を、コンピュータへの入力データとし、センサを利用して所要接合材の開先幅変化を知れば、上記操作をコンピュータで内部演算することにより、溶接条件の自動選択が行える。溶接条件は各開先幅に対して溶接電流、溶接速度の組合せで与えられる。これらから最適溶接条件を、各開先幅に一对一に対応させることは、電流、速度変更のいずれかを優先させることにより行えるが、この手法については次報に報告する。

5. 結 言

ハイピークパルス MIG 溶接による、横向きナローギャップ溶接の自動化を目的として、最適溶接条件の自動選択のための、溶接実験とコンピュータ制御を前提とした考察を行った。

以下に得られた結果を要約する。

(1) ビード高さは(3)式 $eh^2/2d - Wh + V/v = 0$ の解で与えられる。開先幅 W を知れば、 h は溶接電流、溶接速度をパラメータとして与えられる。

(2) ビード表面形状は、平坦性、ぬれ性、対称性を考慮することにより評価され、良好な結果が得られる溶接条件の領域(ビード表面形状良好領域)は、溶接電流、

溶接速度、開先幅を座標軸とした三次元的閉領域で与えられる。

(3) ビード高さを与える (3) 式とビード表面形状良好領域をコンピュータの入力とし、これらを空間的に重ね合わせて、一つの領域を設定する方式を示した。これは開先幅変化に対応して、ビード高さを一定に保持し、ビード表面形状も良好とする適正溶接条件のコンピュータによる自動選択方式を示したことになる。

最後に、本研究の遂行に際し、溶接実験の面で御協力いただいた、朝日山鉄工所技術開発部、松田朝康氏、小島鉄也氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 中山他：“横向き各層1パスI形狭開先接法の研究” 本会講演概要集、第14集 (p. 346~p. 447), 第15集 (p. 492~p. 433), 第17集 (p. 194~p. 195)
- 2) 愛知産業(株)：“パルスドアーク溶接機取扱説明書”
- 3) 愛知産業(株)：“パルスドアーク溶接機に対する総合技術資料”

フェライト—オーステナイト系二相ステンレス鋼 溶接部の時効特性*

村上恭一**, 池内正和**, 西岡章夫**, 河原 渉***

Aging Properties of Two-phase (α - γ) Stainless Steel Weldment*

by Kyoichi Murakami**, Masakazu Ikeuchi**, Akio Nishioka** and Wataru Kawahara***

The effect of aging treatment at 350~850°C on impact properties and microstructures of two-phase stainless steel and its heat affected zone have been investigated.

The relation between impact properties and microstructural changes have been clarified. Results obtained are summarized as follows;

- 1) Impact properties of aged two-phase stainless steel are strongly concerned with 475°C embrittlement and σ phase embrittlement. For each embrittlement impact properties are clearly related to hardness changes.
- 2) For σ phase embrittlement a toughness dip of base metal is equal to that of its heat affected zone. The main reason is that σ phase precipitates with γ phase.
- 3) For 475°C embrittlement, impact properties of base metal are different from that of its heat affected zone, because of the difference of α -grain size.

1. 緒 言

フェライト (α)—オーステナイト (γ) 系二相ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼に比較して耐応力腐食割れ性や耐すき間腐食性に優れていることから最近各種の化学プラント機器に使用されはじめている。しかし、この種合金においては、475°C 脆性及び σ 脆性による靱性の低下が重要な問題であり、その点を十分考慮した設計、施工法を行なうことが必要であるが、従来、これらに関する報告はほとんど見当たらない。

このような背景から 18% Cr の二相ステンレス鋼母材及び溶接熱影響部について 280~850°C の各温度で 5,000 h まで時効処理を施して、475°C 脆性及び σ 脆性による靱性の低下をマイクロ組織、硬さ及び破壊形態などとの関連について考察を行なった。

2. 実験方法

2.1 供試材

本実験には 25.4 ϕ ×2.1 t のチューブ材を使用した。その化学成分を Table 1 に示す。本材は低炭素の二相ステンレス鋼で 1010°C からの水冷による溶体化処理が行なわれている。

Fig. 1 に母材及び溶接熱影響部 (HAZ) のマイクロ組織

*原稿受付 昭和54年5月9日 (昭和53年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 バブコック 日立 (株) 員 研究所 Member, Babcock-Hitachi KK

***正 員 バブコック 日立 (株) 製造部 Member, Babcock-Hitachi KK