高速重ねシーム溶接の接合部形成現象の 基礎的研究(第7報)*

—高速化の問題点とその対策—

山本利雄** 奥田滝夫***

Fundamental Study on Weld Formation Phenomena of High Speed Lap Seam Welding (7th Report)*

—Problem for Improving Welding Speed and their Countermeasures—

by Toshio Yamamoto** and Takio Okuda***

Problems arising with speed up of seam welding and their countermeasures are discussed. These are summarized as follows.

- (1) The upper limit of welding speed is restricted by decrease of $\Delta I_a/I_{av}$. This limit can be raised by arranging preheating electrodes in front of welding electrodes.
- (2) The upper limit of welding speed for air tight welding is restricted by discontinuity of joint for plate thickness less than 0.8 mm.
- (3) As welding speed increases molten metal comes to solidify where electrode does not be applied resulting in occurrence of internal defects. These internal defects can be prevented by arranging forging rollers at the back of welding electrodes.

1. ま え が き

これまでは主として溶接部の形状、電流分布および熱伝導などの面からシーム溶接の接合部形成現象について述べてきたが、本報では高速シーム溶接における問題点と溶接速度の向上策について述べる。

溶接速度を上げることによって生じる第1の問題点は相対的な溶接可能電流範囲 $\Delta I_a/I_{av}$ が減少し、溶接が不安定になることである。第2報²⁾で述べたように、同一溶接速度における $\Delta I_a/I_{av}$ は板厚が大きくなるほど急激に減少するので、 $\Delta I_a/I_{av}$ の減少による溶接速度の制限は主に、1 mm 以上の板厚に対する問題点になる。

第2の問題点は接合部の不連続化の問題である。交流連続通電においても溶接速度が速くなると、入熱の周期的な変動の影響が現われ、溶接電流の瞬時値の最大値付近の位相でナゲットが形成され、他の位相では接合されなくなる。この結果、接合部は不連続になり、気密継手が得られなくなる。板厚が 0.8 mm 以下の場合には $\Delta I_a/I_{av}$ の減少によって規制される溶接速度がかなり大きいので、 $\Delta I_a/I_{av}$ の減少によって溶接速度が制限され

る前に、接合部の不連続化によって溶接速度が制限される。したがって、接合部の不連続化は主に 0.8 mm 以下の板厚に対する問題点になる。

第3の問題点は溶接速度の増加に伴う内部欠陥の発生である。溶接速度が速くなると、接合部の溶融金属が凝固する前に、電極の加圧領域を通過してしまうため、shrinkage cavity などの内部欠陥が発生するようになる。

以下これらの問題点とその対策について詳述するが、第2の問題点の対策と考えられる溶接電流の直流化(直流シーム溶接)については次報で述べる。

2. $\Delta I_a/I_{av}$ の減少による溶接速度の制限と その対策

これまでの報告でたびたび述べてきたように、溶接速度の上限は相対的な溶接可能電流範囲 $\Delta I_a/I_{av}$ が速度の増加とともに減少し、溶接が不安定になることによって制限される。この原因は速度の増加に伴って電極と被溶接材との接触時間が短くなり、大電流短時間加熱条件になるため、板厚方向の温度分布が急峻になり、わずかな溶接電流の変化によって溶込み深さが大巾に変化することに起因している(第1報¹⁾ Fig. 4 参照)。また、極低速の場合を除いて、同一溶接速度における $\Delta I_a/I_{av}$

*原稿受付 昭和52年11月25日 (I IW 1974年度発表)

**正 員 三菱電機(株)商品研究所 Member, Mitsubishi Electric Corporation

***正 員 三菱電機(株)生産技術研究所 Member, Mitsubishi Electric Corporation

は板厚とともに急激に減少するので (第2報 Fig. 10 参照), $\Delta I_a/I_{av}$ の減少による溶接速度の制限は特に厚板のシーム溶接において大きな問題点となる。

以上のように, 溶接速度の上限は電極と被溶接材との接触時間が短くなり, 大電流短時間加熱条件になることによって制限されるのであるから, 何らかの方法で電極と被溶接材との接触時間を長くすればよいことがわかる。この具体的な方法として, 溶接電極の前に予熱電極を配置し, この予熱電極によってあらかじめ板厚方向の温度勾配を作り, さらに溶接電極によって被溶接材の表面を冷却しながら接合面の温度を上げる方法が考えられる。そこでこの方法の効果を確かめるため, Fig. 1 に示すように, 本溶接材の前にもう一台の予熱用のシーム溶接機を, 溶接線が一致するように向きをかえてならべて溶接を行なった。

Fig. 1 Arrangement of preheating electrodes

その結果の一例として, 板厚が 3.2 mm の場合の実験結果を Table 1 に示す。表にみるように, 予熱電極がない場合は 1 m/min の溶接速度で $\Delta I_a/I_{av}$ が 4% であり, 1.5 m/min の速度では $\Delta I_a/I_{av}$ がほぼ零となっており良好な溶接ができないが, 予熱を使用することにより 4 m/min の溶接速度においても $\Delta I_a/I_{av}$ が 8% となり, 溶接可能な最大溶接速度がかなり向上できる。なお, この方法において, 予熱電極と溶接電極との距離を長くとると, 予熱電極によって作られた板厚方向の温度勾配が溶接電極に達するまでに平均化してしまい, 予熱の効果

が低下するので, 両電極間の距離はできるだけ短い方が好ましい。

3. 接合部の不連続化による溶接速度の規制

通常のシーム溶接で用いられているパルスーション通電においては比較的低速において接合部が不連続になる。たとえば, 板厚 1.2 mm, 加圧力 480 kg, 加熱時間 1 サイクル, 冷却時間 1 サイクルの条件では 5 m/min 以上の溶接速度において接合部が不連続になる。交流連続通電においても溶接速度が 10 m/min 以上になると交流電流の周期的な脈動の影響が現われる。

Photo. 1 は交流連続通電のシーム溶接で現われる種々の接合形式の断面写真であり, Fig. 2 はこれを図示したものである。A 形は交流の 1/2 サイクルに対応して, 圧接部と未接合部が周期的に現われる形式であり, A' 形は圧接部と未接合部が不規則に混在するもので, 比較的低速で溶接電流が不十分な条件で現われる。B 形は未接合部がなく, 連続的な圧接状態になっているもので, 板厚が 1.2 mm 以上で, 3 m/min 以下の低速の条件で現われる。C 形は交流の 1/2 サイクルに対応してナゲットが形成されるが, ナゲットが不連続でかつナゲットの間に未接合部の存在するものであり, D 形は C 形においてナゲット間が圧接されているものである。E 形と F 形はナゲットが連続的にできている形式で, E 形は 1/2 サイクルに対応して溶込み深さが周期的に変化しているものであり, F 形は溶込み深さがほぼ一定のものである。

これらの接合形式のうち, A, A', C 形のは, JIS-Z-3141 に規定された漏れ試験を行なうと水漏れが生じ, 気密継手にならない。また, B 形と D 形の接合形式は一応気密継手になるが, 安定性の点で問題がある。実験の結果によると, これらの接合形式の現われかたは溶接電流, 速度, 加圧力および板厚によって変化する。

Fig. 3 は板厚が 0.5 mm, 加圧力が 390 kg の場合の溶接速度と溶接電流による接合形式の分布を示したものである。図にみるように, 溶接速度が 5 m/min 以下では交流電流の脈動の影響を受けず, 電流の増加に応じて, A' 形から F 形に移行するが, 10~15 m/min の速度範囲では, 電流の増加に応じて A 形→C 形→E 形と変化する

Table 1 Effect of preheating electrodes on max. welding speed

Thickness (mm)	Condition	Electrode force (kg)		Welding current (kA)		$\Delta I_a/I_{av}$ (%)	Welding speed (m/min)
		Preheat	Weld	Preheat	Weld		
3.2	Without preheating	—	1,250	—	24~25	4	1
	With preheating	880	1,250	21	25~27.1	8	4

Photo. 1 Macrophotographs showing various types of joint

Fig. 2 Various types of joint appeared in seam welding

る。15 m/min 以上の溶接速度では、電流の増加に対してのA形→C形→D形と接合形式が変化し、連続したナゲットが得られなくなる。

板厚が 0.8 mm の場合も同様の接合形式が現われるが、A形、C形、D形、E形の現われ始める溶接速度

Fig. 3 Diagram showing dependence of type of joint on welding speed and welding current

が、それぞれ 7, 12, 16, 12 m/min と高速側に移行している点異なる。板厚が 1.2 mm 以上では、10 m/min 以下の溶接速度で $\Delta I_a/I_{ao}$ が小さくなって安定した溶接ができなくなるが、この溶接速度以下の範囲では全て A' 形、B 形および F 形の接合形式であり、交流電流の脈動の影響はほとんど現われない。板厚の増加とともに、各接合形式の現われる溶接速度が高速側に移行する理由は、板厚が厚くなるに従って接合面の通電領域の長さが大きくなること⁴⁾と、接合面付近の温度の脈動が、板厚が厚くなるほど少なくなる⁵⁾ためであると考えられる。

加圧力が高くなると、各接合形式の現われる溶接速度が高速側に、溶接電流が高電流側に移行するが、その変化は小さい。

シーム溶接は基本的に気密継手の得られる所に特長があり、したがって、気密継手を前提にすると、0.8 mm 以下の板厚では、上述のように接合部の不連続化によっても溶接速度の制限を受けることになる。また、第 1 報において、溶込み率が 70~80% になると、ビード表面が不規則な凹凸になることを述べたが、この不規則ビードも実用上好ましくない場合が多い。更に、Fig. 3 の bead edge flash の領域では外観が著しく悪くなることと、火花のようなチリを発生し、溶接作業に支障をきたすので、これも実用上好ましくない(第 2 報 Photo. 2 参照)。

そこで、気密継手を得られかつ外観の美しい溶接の得

Fig. 4 Relation between max. welding speed and plate thickness

られる電流範囲 ΔI_b として、接合形式が B, D, E, F 形となる電流値から、ビードの表面形状が不規則あるいは bead edge flash が発生するまでの電流範囲を考えた。そしてこの ΔI_b 間の平均電流を I_{av} として、 $\Delta I_b / I_{av}$ が 10%^{*} 以上となる最大溶接速度と板厚の関係を Fig. 4 の実線で示している。なお図中の点線は、ナゲットが形成される直前の電流値から表チリの発生するまでの電流範囲 ΔI_a とその間の平均電流 I_{av} との比 $\Delta I_a / I_{av}$ が 10% 以上となる最大溶接速度と板厚の関係を示している。図にみるように、板厚が 1.2 mm 以上では、接合部の不連続化が生じないことと、最大溶接速度付近の不規則ビード領域の電流巾が狭いため (第2報 Fig. 7 参照)、実線と点線の差は少ないが、板厚が 1 mm 以下では、 ΔI_b に対する最大溶接速度は ΔI_a に対するそれに比べて著しく減少している。これは板厚が 1 mm 以下では不規則ビードや bead edge flash の発生する電流巾が広いことと、0.8 mm 以下の板厚では A 形および C 形の接合形式が現われることによって ΔI_b が小さくなるためである。また、板厚が薄いほど A 形や C 形の接合形状が低い溶接速度で現われるとともにその電流幅が

相対的に大きくなるため、板厚が 0.5 mm の場合の最大溶接速度は 0.8 mm の場合よりも小さくなる。この結果、交流連続通電のシーム溶接においては、Fig. 4 にみるように、板厚が 0.8 mm の付近で最大溶接速度が極大になる。

このように、0.8 mm 以下の薄板においては、交流電流の脈動によって不連続な接合形式が現われることと、交流の 1/2 サイクルごとのピーク電流によって bead edge flash が発生することによって、外観の良好な気密継手の得られる最大溶接速度が制限される。したがって、溶接電流を直流化することによって 0.8 mm 以下の板厚に対する最大溶接速度の向上が図れると考えられるが、これについては次報で詳しく述べることにする。

4. 内部欠陥の発生とその対策

溶接電流が過大な場合や溶接速度が速い場合、Photo. 2 (a), (b) に示すような Shrinkage cavity や割れ (以下内部欠陥という) がナゲットの内部に発生するようになる。この原因は溶融金属が加圧力のかからない状態で凝固することによると考えられる。そこで溶融池の大きさと加圧領域との相対的な位置関係を明らかにするため、溶接中の溶融池の長さを次の方法で測定した。

Photo. 2 Macrophotographs showing internal defects

一方の被溶接材の接合面に板厚 0.05 mm、巾 5 mm、長さ 20 mm のニッケル箔をあらかじめマイクロ・スポット溶接機でとめておき、もう一方の被溶接材を重ね合わせて、溶接電流を流さずに適当な加圧力を加えて円板電極間を通過させることにより、Ni 箔を被溶接材内に埋没させた。しかる後、定められた溶接条件で溶接し、その縦断面から溶接中の溶融池の長さを求めた。すなわち、溶融池の先端が Ni 箔の後端に達すると、Ni 箔は溶融して溶融池の金属と混り合い Fe-Ni 合金を作る。Photo. 3 はこのようにして作成したサンプルの縦断面を示している。Photo. 3 (a) にみるように、溶接速度が 1 m/min のものは溶融状態に滞留している時間が長いた

^{*}1 溶接中の電源電圧の変動や表面状態のばらつきを考えると、10%位が実際溶接できる下限値と考えられる。

Photo. 3 Macro photographs showing length of molten pool

め、Ni は被溶接材の溶融金属とよく混り合っており、Fe-Ni 合金の形状から判断して Ni は溶接中の溶融池のほぼ後端にまで達していると考えられる。また、溶融池の後端で内部欠陥の発生しているのが認められる。

Photo. 3 (b) の溶接速度が 7 m/min のものは溶融状態に滞留している時間が短いため、Fe-Ni 合金の後端は明瞭でないが、少なくとも Fe-Ni 合金ができていた所までは溶融状態になっていたことは明らかである。溶融池の最小長さは、あらかじめ野書いた Ni 箔の後端の位置から Fe-Ni 合金が形成されている領域の後端の位置までの距離から求められる。また、電極の中心線から溶融池の後端までの距離 E_m は、別の実験によって、その条件でのナゲットの形成開始点と電極の中心線との距離を求めておき、これに上述の溶融池の長さを加えて求めた。

一方、接合面の加圧領域については、直接的な測定が困難であるので、その目安として電極と被溶接材との通電領域（ほぼ接触領域に等しい³⁾）の後端と電極の中心線との距離 E_s を考えた。

Fig. 5 は、板厚 1.2 mm 、速度 7 m/min 、加圧力 920 kg の場合について求めた、溶接電流と E_m 、 E_s の関係を示している。図にみるように、 E_m 、 E_s とも溶接電流の増加に伴って大きくなる傾向にあるが、 E_m の増加割合の方が大きいため 28 kA 以上で E_m は E_s より大きくなっている。前述のように、 7 m/min の溶接速度では Ni が溶融池の後端にまで達していないことが予想されるので、実測の溶融池は Fig. 5 の E_m よりさらに後方で延びている可能性がある。

このように、溶接電流の増加とともに溶融池の後端は電極と被溶接材が接触している所よりかなり後の方にまで延びており、溶融金属は加圧力のかからない状態で凝

Fig. 5 Variation in E_m and E_s with welding current

固するようになり、これがナゲット内に内部欠陥を発生する原因であると考えられる。また、溶接速度の増加に伴って単位時間当たりの被溶接材の移動距離が大きくなり、溶融金属が凝固するまでに移動する距離が大きくなる。この結果、溶融金属は加圧領域からはずれた所で凝固する可能性が大きくなり、これが高速の条件において内部欠陥がより発生しやすくなる原因であると考えられる。

この内部欠陥を防止するためには、溶融金属が凝固する際になんらかの方法で加圧力を加えておけばよい。そ

Fig. 6 Arrangement of forging rollers

の具体的な方法として、溶接後に加圧ローラで押えながら冷却する方法が考えられる。そこで、この加圧ローラの効果を確かめるために、Fig. 6 に示すような5段の加圧ローラを並べた装置を成し、溶接電極の後方に設置して溶接を行なった。なお、被溶接材が加圧ローラをスムーズに通過するように、加圧ローラの最終段の後にドライブローラを設け、被溶接材の溶接速度と同期するように、エアーモータでドライブローラを駆動した。

Fig. 7 はその結果で、内部欠陥の比較的良好に発生する条件として、 $t=0.8\text{ mm}$, $p=660\text{ kg}$, $v=10\text{ m/min}$ を選び、溶接電極の中心線と第1加工ローラの中心までの距離 l_F および溶接電流と内部欠陥の発生傾向を求めたものである。図より明らかなように、 l_F の減少とともに cavity を発生する電流幅が小さくなり、 l_F が 100 mm 以下の条件で内部欠陥をほぼ防止できることがわかる。

Fig. 7 Effect of l_F on occurrence of internal defects

5. 結 論

溶接速度を上げることによって生じる問題点とその対策について検討した結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 溶接速度を増加すると相対的溶接可能電流範囲 $\Delta I_a/I_{a0}$ が減少して最大溶接速度が制限される。これに対しては、溶接電極の前に予熱用の電極をできるだけ接近させて配置することにより最大溶接速度の向上がはかれる。

(2) 0.8 mm 以下の板厚では、接合部が不連続になることによって気密継手の得られる最大溶接速度が制限される。

(3) 溶接速度が増加すると、溶融部が加圧力のかからない状態で凝固するようになって内部欠陥が発生する。溶接電極の直後に鍛造ローラを配置することによってこの内部欠陥の発生を防止できる。

参 考 文 献

- 1) 山本, 奥田: 高速重ねシーム溶接の接合部形成現象の基礎的研究 (第1報), 本誌, 46-8 (1977) 54-61
- 2) 山本, 奥田: 同 (第2報), 本誌, 46-9 (1977) 63-70
- 3) 山本, 奥田: 同 (第3報), 本誌, 46-10 (1977) 40-45
- 4) 山本, 奥田: 同 (第4報), 本誌, 47-2 (1978) 22-29
- 5) 安藤, 中村: 点溶接における通電加熱・冷却に関する熱時間定数について (第2報), 本誌, 26-12 (1957) 14-18