

技術報告

UDC 621.774.21 : 621.791.754 : 621.791.753.5

厚肉 UOE 鋼管製造のための大電流 MIG+タンデムサブ
マージアーク溶接法の開発平林清照*・平 忠明*²・市之瀬弘之*³・平野 攻*⁴Development of High Current MIG+2SAW Technique for Heavy
Wall UOE Linepipes

Kiyoteru HIRABAYASHI, Tadaaki TAIRA, Hiroyuki ICHINOSE, and Osamu HIRANO

Synopsis :

MIG+2SAW technique has been developed for longitudinal welding process to produce the heavy wall UOE linepipes up to 50 mm in thickness.

(1) An experimented MIG+2SAW equipment is designed so that the leading electrode is DCRP for high current MIG welding and the middle and trailing electrodes are connected in Scott transformer connection for 2SAW. This equipment placing MIG and 2SAW torches on one cart can weld test plates with one-run. The arc interaction between MIG and 2SAW has hardly been observed.

(2) MIG+2SAW process is devised to disperse the heat input to decrease it per one molten pool as compared with 3SAW because a torch spacing between MIG and 2SAW is long enough and two molten pools are formed. Therefore weld metal and HAZ in the center of plate thickness by MIG+2SAW process give a better toughness than those by 3SAW.

(3) As the heat input of 2SAW on MIG+2SAW process can be lowered as compared with that of 3SAW, MIG+2SAW process consumes a fewer fluxes than 3SAW. The shielding effect of the molten slag is scarcely deteriorated because it is not overheated even if the fused flux is used. As a result the weld bead in 50 mm thickness plate is sound and slippery.

1. 結 言

UOE 鋼管の需要は今後厚肉化の傾向にあるために、きわめて能率の高い 3 電極サブマージアーク溶接 (3SAW) を厚肉鋼管に適用するのが本来は好都合である。しかし現状の溶融型フラックスを用いた 3SAW の場合、板厚 40 mm 以下は両面 1 層溶接が良好であるが、それ以上の板厚においては、フラックスの高温における粘性と融点の問題となつて、ビード形状が劣化し、溶接電流に限界を与えることをすでに明らかにした¹⁾。また大入熱の 3SAW でもつて厚肉鋼管を溶接した場合、溶接部の靱性劣化が著しい。そこで 3SAW におけるこれらの問題点を解決するものとして、溶接プロセスの面から大電流

MIG+2SAW 法について検討を行い、良好な継手を得る方法を確立した。一方、高木²⁾は小電流細径の CO₂ 溶接と単電極 SAW を組み合わせた溶接法について報告しているが、この方法は 3SAW に比べて溶着量が少なく、板厚 50 mm の厚肉鋼管を両面 1 層溶接できなかつた。また藤森³⁾は細径ワイヤを用いた大電流密度の MIG 溶接法と SAW 法を組み合わせた溶接法について報告しているが、管厚 50 mm までの厚肉鋼管の溶接を対象とした報告ではなく、上垣⁴⁾は 44mm 厚の厚肉鋼管を対象に大電流 MIG+SAW 溶接法について報告しているが、この場合の大電流 MIG トーチと SAW トーチは同時に 1 ラン溶接することのできる機構ではなかつた。一方、TANAKA⁵⁾は大電流 MIG を単独またはタンデ

昭和 54 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 10 月 22 日受付 (Received Oct. 22, 1980)

* 日本鋼管(株)技術研究所福山研究所 (Fukuyama Laboratories, Technical Research Center, Nippon Kokan K.K., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

*² 日本鋼管(株)技術研究所福山研究所 工博 (Fukuyama Laboratories, Technical Research Center, Nippon Kokan K.K.)

*³ 日本鋼管(株)技術研究所福山研究所 Ph. D (Fukuyama Laboratories, Technical Research Center, Nippon Kokan K.K.)

*⁴ 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K.K.)

ム MIG (2MIG) で用いる方法をすでに開発している。本研究の MIG+2SAW 法は L 極で大電流 MIG 溶接を行い、M 極と T 極をスコット結線にしたタンデム SAW (2SAW) を組み合わせて、1 ランで溶接する方法であり、MIG と 2SAW の極間距離を約 350 mm 以上離しているために、2 溶融池になつている。大電流 MIG 溶接によつて深溶込みが得られ、後続の 2SAW によつて平滑なビード外観が得られる。かつ本方法は溶接する時の溶接入熱を分散できるので高靱性が要求されるラインパイプの溶接に適した方法である。今回、板厚 38 mm と 50 mm の鋼板を使用した厚肉鋼管の製造のために、MIG+2SAW 法による両面 1 層溶接継手の性能を、従来の 3SAW、2SAW と比較した結果及び一部は管厚 38 mm の鋼管をタンデム MIG (2MIG)+SAW 溶接した結果についてもあわせて報告する。

2. 実験方法

本研究では、板厚 38 mm と 50 mm の鋼板と鋼管を用いた。各供試鋼板と鋼管のグレードおよび適用した溶接プロセスの関係を Table 1 に示す。サンプル No. A と C は Mn-Nb-V 系成分を 38 mm と 50 mm に圧延した鋼板で MIG+2SAW 溶接と 3SAW の溶接試験をした。B と D はグレード 5LB であり、実管を試作し、B は 2MIG+SAW と 3SAW 法で D は 3SAW で溶接をした。板厚 38 mm と 50 mm 鋼板の MIG+2SAW 法と 3SAW の溶接条件を Table 2 に示す。板厚 38 mm の鋼板を 3SAW した場合の溶接入熱は 122.5 kJ/cm であるのに対して、MIG+2SAW 法は (33.1+83.8) kJ/cm である。板厚 50 mm の場合の 3SAW の溶接入熱は 224.5 kJ/cm であるのに対して、MIG+2SAW 法は (55.1+150.8) kJ/cm である。MIG+2SAW 法は MIG と 2SAW の 2 溶融地になつており、入熱の分散化を図ることができるので、3SAW よりも靱性に対して有利である。供試溶接ワイヤは MIG と SAW とともに、同一成分の C-Si-Mn-Ni-Mo-Ti 系の 4.8φ のワイヤ A を用いた。供試フラックスは溶融型を用い、(a) 塩基度⁶⁾

$BL = -0.45$ の含 CaF_2 中性フラックス (b) 大入熱溶接用に市販されている $BL = -1.90$ の高 SiO_2 系酸性フラックスを用いた。

3. 試作した MIG+2SAW 溶接機

試作した MIG+2SAW 溶接機は既設の 3SAW 溶接機の L 極を容量 2000 A の直流トランスに接続できるように改造し、制御盤は MIG と SAW が併用できるように副操作箱を設けて収納した。L 極の MIG の電源特性は垂下特性の DCRP である。M 極と T 極は交流のスコット結線にした 2SAW を L 極と同一台車に載せて 1 ラン溶接する装置である。Fig. 1 は MIG と 2SAW トーチの関係を模式的に示した図である。MIG トーチは 2 重シールド方式⁷⁾ とし、内ガスは Ar+CO₂ の混合比を 1:1 にして、外ガスおよびアフターシールドは純 Ar とした。

4. 実験結果

4.1 MIG+2SAW 法と他の溶接法による溶接金属の靱性比較











まず、実験室的に鋼板を用いて、本研究の MIG+2SAW 法で得られる溶接金属の靱性を従来の 3SAW 法と比較検討した。Fig. 2 は板厚 50 mm の鋼板 C を用いて、MIG+2SAW、2SAW の多層溶接および 3SAW で溶接した時の溶接金属の靱性を示す。溶接材料は全て、ワイヤ A と中性フラックス a および一部は大入熱用に市販されている酸性フラックス b を用いた。MIG+2SAW 法は 2SAW 法の内面 1 層、外面 2 層の溶接法と

Table 1. Relation between welding process and sample No.

W.T. (mm)	Sample No.	Gr.		Welding Process		
				MIG+2SAW	2MIG+SAW	3SAW
38	A	x 52	Plate	○	-	○
	B	5LB	Pipe	-	○	○
50	C	x 52	Plate	○	-	○
	D	5LB	Pipe	-	-	○

○ : Experimented

Table 2. Welding condition for 3SAW and MIG+2SAW processes.

Process	Electrode	Wire dia. (mm)	Electrode Angle	Wire Spacing (mm)	Thickness 38 mm				Thickness 50 mm					
					Bevel	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/cm)	Bevel	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Speed (mm/min)	Heat Input (kJ/cm)
3SAW	1	4.8	0°	30		1200	37							
	2	4.8	15°	30		880	40	550	122.5		1200	37		
	3	4.8	25°	30		760	43				880	40	300	224.5
MIG+2SAW	1	4.8	12°	380		950	29							
	2	4.8	5°	18		1000	35	500	33.1		1100	29	300	55.1
	3	4.8	15°	18		850	41		83.8		900	41		150.8

Note. MIG gas condition 1) Inner shield : Ar 40 l/min+CO₂ 40 l/min 2) Outer shield : Ar 50 l/min 3) After shield : Ar 50 l/min

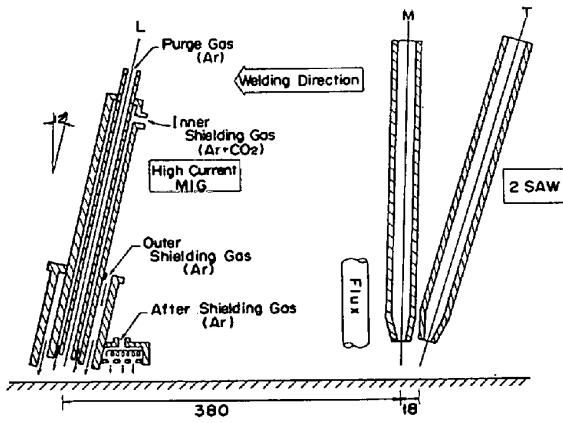


Fig. 1. Schematic diagram of MIG+2SAW process.

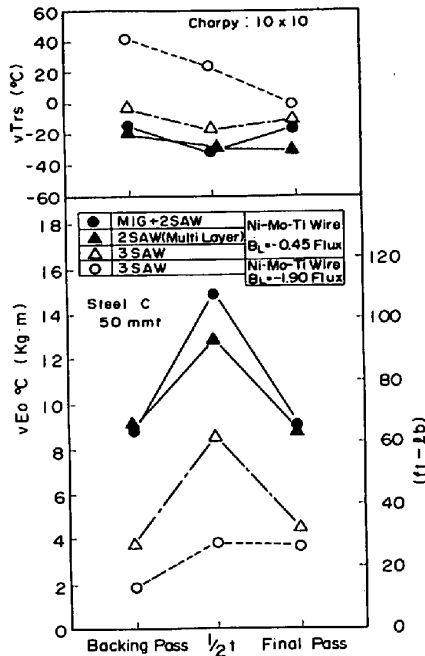


Fig. 2. Toughness of weld metal in MIG+2SAW and other SAW processes.

同程度の靱性を示すが、能率上の観点から1ランで溶接できるMIG+2SAW法の方が有利である。3SAWの溶接金属の靱性はMIG+2SAW法および2SAW法の多層溶接よりも劣化している。更にフラックスを酸性のbにした場合の溶接金属の靱性は酸素含有量(550ppm~650ppm)の増加によつて著しく劣化することが認められる。次に工場で管厚38mmの鋼管を用いて、2MIG+SAW溶接を行い、溶接金属の靱性を3SAW法と比較した。Fig. 3は管厚38mmの鋼管Bを用いて、2MIG+SAWの組み合わせで溶接した場合の溶接金属の靱性を示す。2MIGにしてMIG溶着部分を増すことによつて板厚中央の溶接金属は3SAWに比べて著しい高靱性が得られるが、内面側と外面側の溶接金属の靱性は3SAWのそれと同等である。

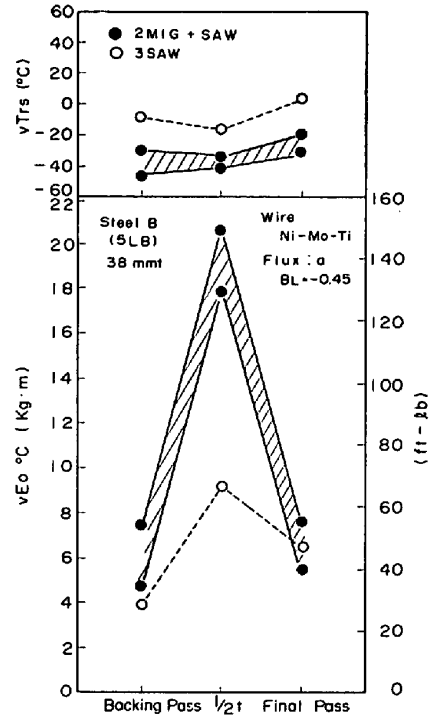


Fig. 3. Effect of welding process on toughness of weld metal.

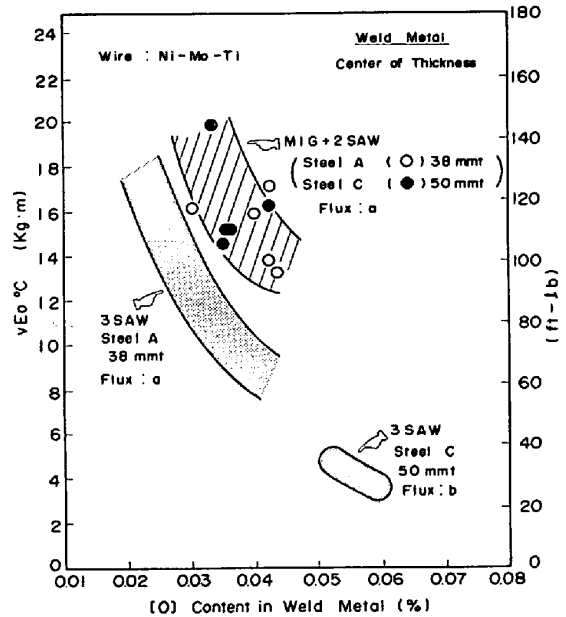


Fig. 4. Effect of [O] content on toughness of weld metal.

4.2 MIG+2SAW法および3SAWにおける溶接金属の靱性におよぼす酸素の影響

Fig. 4は鋼板AとCを用いたMIG+2SAW法の酸素含有量と溶接金属の靱性の関係を従来の3SAWと比較検討した結果である。従来から溶接金属の酸素含有量が200ppm以上でかつ高い程、靱性が劣化することが明らかになっている⁸⁾⁹⁾。しかし今回フラックスaを用いた

MIG+2SAW 法と 3SAW 法の酸素含有量は 280~430 ppm の範囲で同程度であるにもかかわらず、同一鋼板と同一溶接材料において、MIG+2SAW 法は 3SAW よりも良好な靱性値を示す。この理由は、後述するが、MIG+2SAW 法の方が 3SAW よりも、粗大の初折フェライトが少ないことによるものである。大入熱用の酸性フラックス b を用いた 3SAW の酸素含有量は 550~630 ppm と多量になるため、溶接金属の靱性の低下が大きいことを認めた。この結果から厚肉溶接の場合における MIG+2SAW 法は 3SAW を用いるよりも、同一酸素含有量において、得られる靱性は高く良好な方法といえる。

4.3 MIG+2SAW 法と 3SAW の HAZ 靱性比較

Fig. 5 は板厚 50 mm の鋼板 C でもつて MIG+2SAW 法と 3SAW 法における板厚中央から採つた HAZ 靱性の比較を示す。3SAW は HAZ の脆化が顕著であるが、MIG+2SAW 法の HAZ は脆化の度合いが少なく良好であつた。MIG+2SAW 法の HAZ 靱性が 3SAW よりも良好な理由は、5.1 項で詳述するごとく、HAZ の受ける熱サイクルの状態が異なること、およびビード形状の差に起因する。板厚 38 mm の鋼板 A の場合においても、MIG+2SAW 法の板厚中央の HAZ の靱性は 3SAW 法よりも約 50% 高い吸収エネルギーを示す事が認められ

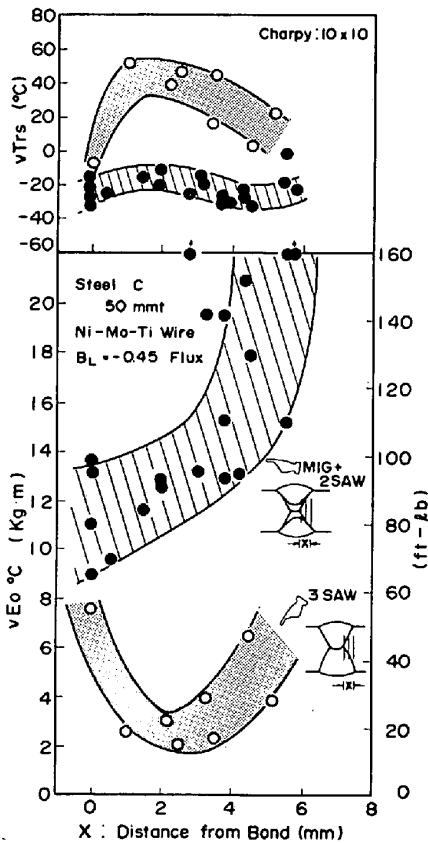


Fig. 5. Toughness of HAZ in MIG+2SAW and 3SAW process.

た。このように、MIG+2SAW 溶接法の方が板厚中央において、3SAW よりも HAZ 靱性は良好であることがわかつたので、次に HAZ の靱性におよぼす板厚方向の影響について検討した。MIG+2SAW 法の溶接金属のすべてが SAW に相当する板厚の外面側および内面側からサンプリングした HAZ の靱性を 3SAW の HAZ 靱性と比較した。Fig. 6 は板厚 38 mm と 50 mm の鋼板 A と C を用いて、フラックス a で MIG+2SAW 法と 3SAW で溶接した時のファイナルパス側の HAZ とバックパス側から試料採取した場合の靱性の比較を示す。図からわかるように MIG+2SAW 法の HAZ 靱性は 3SAW のそれと同等以上の靱性を示した。また両溶接法ともにバックパス側から試料採取した HAZ の靱性は、ファイナルパスの熱サイクルを受けることによつて、ファイナルパス側から試料採取した場合よりも HAZ 靱性はやや良好である。

5. 考 察

5.1 MIG+2SAW 法の熱サイクルおよび溶接金属と HAZ の顕微鏡組織

板厚 38 mm の鋼板 A を用いて、MIG と 2SAW の極間距離を 380 mm に離れた場合の MIG+2SAW 法のボンド部の熱サイクルと通常の 3SAW の熱サイクルを比較した結果を Fig. 7 に示す。測定は図中に示すように、V 溝開先をとつた鋼板の裏面からドリルホールをあけて、MIG のボンド部を測温しうるようにした。MIG+

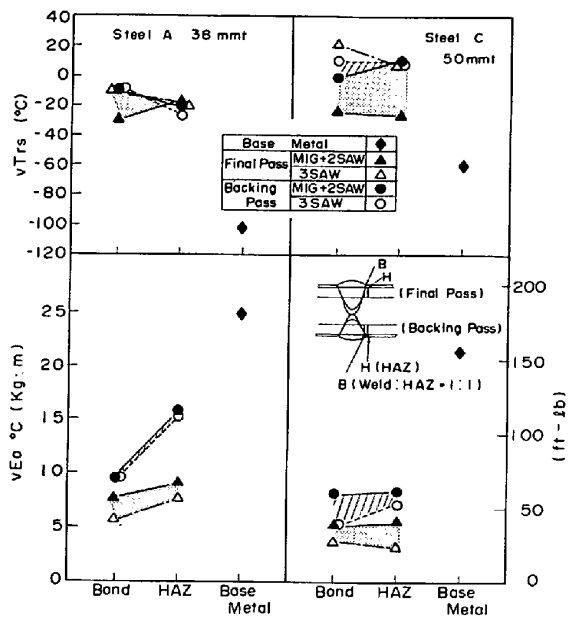


Fig. 6. Effect of through-thickness direction on toughness of HAZ in MIG+2SAW and 3SAW process.

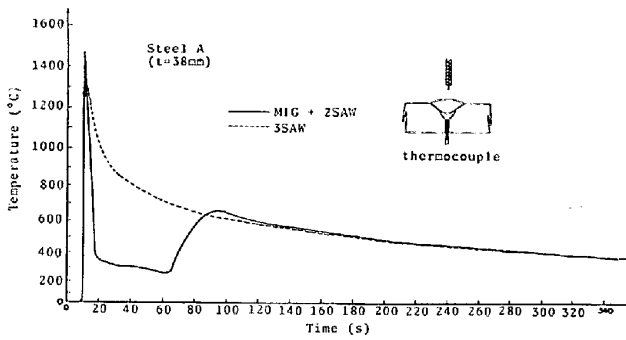


Fig. 7. Heat cycle pattern of MIG+2SAW and 3SAW processes.

2SAW 法は溶接金属と HAZ の組織が粗大化して靱性劣化を起こす約 1000°C 以上の加熱時間が、3SAW よりも半分以下に減少していることが認められ、溶接入熱を分散し、1 溶融池当たりの入熱を小さくすることができる。また L 極の MIG ビードが Ar 変態点以下に冷却された後、後続の 2SAW によつて再熱効果を受けるので、靱性に対して有効に作用することがわかつた。Photo. 1 は板厚 50mm の鋼板 C を MIG+2SAW 法と 3SAW 法で溶接した時の顕微鏡組織を比較して示した結果である。MIG+2SAW 法の SAW 溶接金属部分および板厚中央の MIG 溶着部分は溶接入熱を分散し 1 溶融池当たりの入熱を小さくすることができるので、3SAW 溶接金属部分よりも粗大フェライト量が少なく、大部分アシキラーフェライトになつており、このような組織は溶接金属の靱性に対して良好であることが明らかにされ

ている¹⁰⁾¹¹⁾。HAZ に関しても MIG 溶着部分の HAZ 粗粒域は後続の 2SAW によつて、再度 A_{c3} 点以上に加熱されるために、HAZ 細粒域と同じく、大部分がアシキラーフェライト化している。外面側の SAW の HAZ 粗粒域は両溶接法ともに、同様の組織を示しており、大部分上部ベイナイトになつているのが認められる。Photo. 2 は管厚 38mm の鋼管 B と板厚 50mm の鋼板 C の MIG+SAW 溶接法および 50mm の鋼管 D の 3SAW 法のマクロ組織を示す。溶融型フラックス a を用いて管厚 50mm の鋼管 D を 3SAW したビード形状は、バックパシの波目が荒いのに対して、板厚 50mm の鋼板 C を MIG+2SAW 法で溶接した場合は良好なビード形状が得られる。また 2MIG+SAW 法において、MIG 溶着部分を増した鋼管 B のビード形状はマッシュルーム状のビードになる。また板厚 50mm の鋼管を SAW 法で入熱制限をして、内面 1 層、外面 2 層の積層で溶接した場合はマクロ形状が良好となるが、能率の低下が大きい。このようにマクロ形状の結果からしても、板厚 50mm の溶接を対象とする場合には、MIG+2SAW 法が最適であると考えられる。

5.2 MIG+2SAW 法と 3SAW 法の溶融速度とフラックス消費量の比較

MIG+2SAW 法のワイヤの溶融速度とフラックス消費量について検討した結果を 3SAW のそれと比較した。Fig. 8 は MIG+2SAW 法と 3SAW 法の電流和と溶融速度の関係を示す。ハッチング部分はすでに明ら

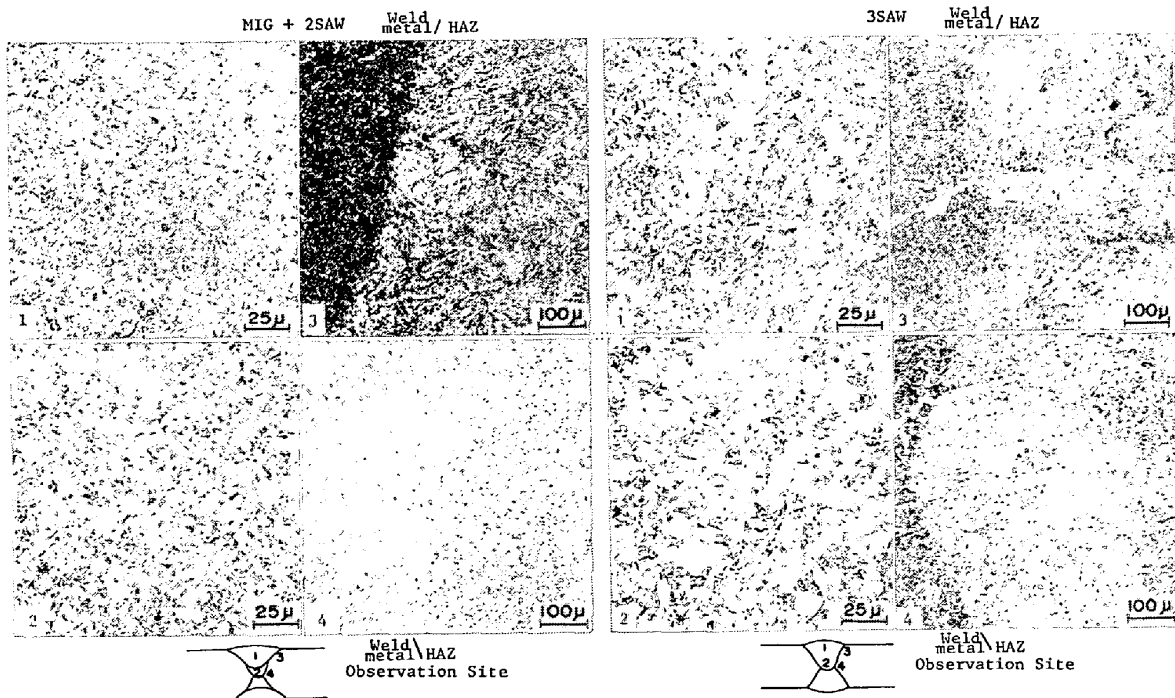


Photo. 1. Micro-structures of welded joint in MIG+2SAW and 3SAW processes. (Steel C)

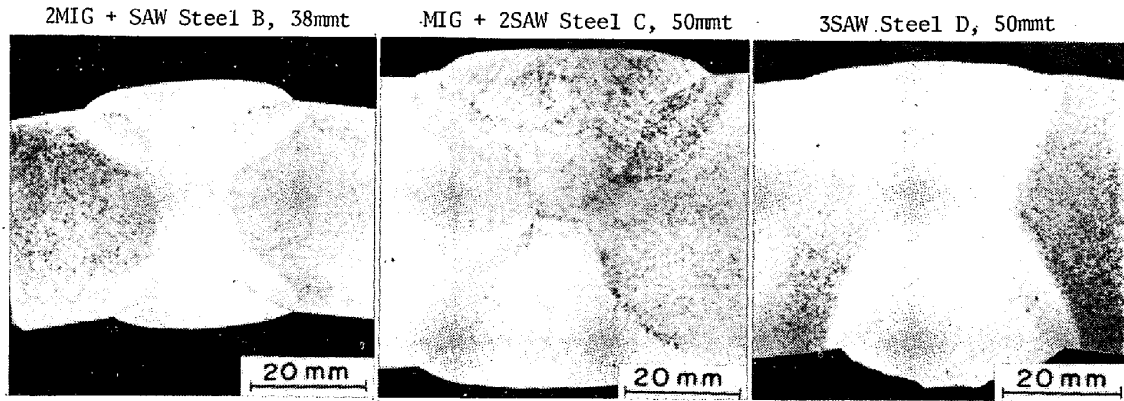


Photo. 2. Macro-structures of welded joint in MIG+SAW and 3SAW processes.

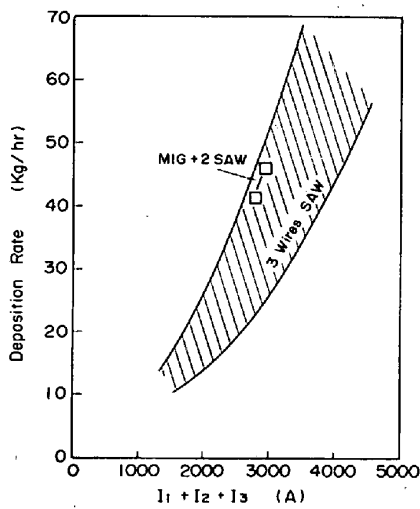


Fig. 8. Relation between sum of current and deposition rate.

かにした¹²⁾ 3SAW 法の電流和とワイヤの溶融速度の関係である。この図に MIG+2SAW 法の溶融速度をプロットした結果は、同一電流において、3SAW 法の範囲の上限近くにあり、MIG+2SAW 法は 3SAW 法と比べて同等以上である。これはフラックスを溶融するのに必要な熱量が少なく熱効率が良好であるためによるものと考え¹³⁾。Fig. 9 は溶接入熱とフラックス消費量の関係を MIG+2SAW 法と 3SAW 法を比較して示す。同一入熱で比較した場合、MIG+2SAW 法は 3SAW 法よりもフラックスの消費量が少なく、2SAW 法の外そう上に位置している。これは L 極が MIG であり、SAW の電極数が 2 極であることにより SAW における入熱は 3SAW に比べて低入熱になるので、溶融スラグの過熱が生じず、シールド機能の低下も少ない。このために、溶融型フラックスにおいても、Photo. 2 に示したように、板厚 50mm の MIG+2SAW 法による溶接ビードは滑らかである。

5.3 MIG+2SAW 溶接法のアーク現象

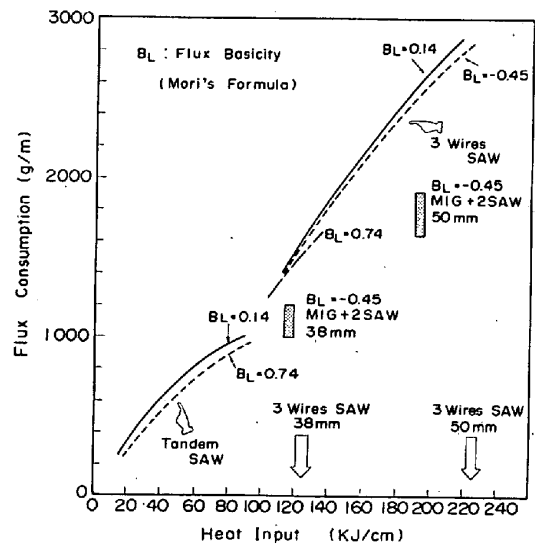


Fig. 9. Relation between heat input and flux consumption.

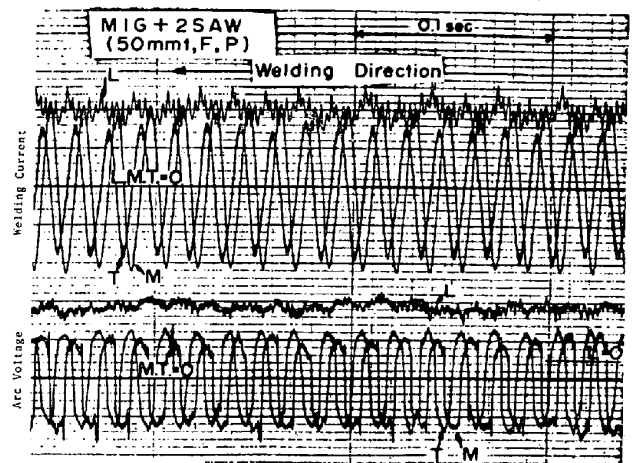


Fig. 10. Oscillogram of welding current and arc voltage in MIG+2SAW process. (Steel C)

大電流 MIG 自身を 2 電極または 3 電極でもつて、UOE 鋼管溶接に適用する場合、溶接電流、アース位置、電極間の相互干渉および鋼管自身の磁化によつて、

アークの偏向を受ける事が明らかになっており、種々の対策を講じる必要がある⁵⁾¹⁴⁾。Fig. 10 は板厚 50mm の鋼板 C を MIG+2SAW 法でもつてファイナルパス溶接した時の溶接電流とアーク電圧を電磁オシログラフで測定した結果を示す。アース位置は開始端である。MIG と SAW のトーチ間隔を 380 mm 離れたことと SAW は交流であるために、L 極の MIG 溶接はアークの相互干渉が少ないので、正常なスプレー移行を得ることができ、グロービュールおよび短絡移行は認められない。M 極と T 極をスコット結線にした交流の 2SAW のアーク現象に関しても、溶接電流とアーク電圧の振れは小さく良好であり、通常の 2SAW と何ら遜色はなかつた。

以上述べた事柄から本方法の MIG+2SAW 法は厚肉鋼管の溶接に対して良好な溶接方法であることがわかつたので、大径管工場の溶接機に適用することを検討している。

6. 結 言

溶接プロセスの面から板厚 38 mm と 50 mm を対象とした厚肉鋼管製造のための溶接法として、大電流 MIG+2SAW 法について検討を行い、本方法による溶接継手の性能を 3SAW と比較して、次の事柄を明らかにした。

(1) 試作した MIG+2SAW 溶接機は L 極を DCRP にして、M 極と T 極は交流のスコット結線にした 2SAW を L 極と同一台車に載せて 1 ラン溶接する装置である。MIG と SAW のトーチ間隔は約 350 mm 以上離れたことと SAW は交流であるために、アークの相互干渉は緩慢であつた。

(2) 本溶接装置によるワイヤの溶融速度は 3SAW 法の同一電流和で比較した場合、同等以上であり、それはフラックスを溶融するのに必要な熱量が少なく熱効率が良好なためによるものである。また本方法は同一入熱において、3SAW よりもフラックスの消費量は少ない。従つてスラグの過熱によるシールド機能の低下を招かないので、溶融型フラックスにおいても、50mm 厚の溶接ビードは健全で滑らかである。

(3) MIG+2SAW 法は MIG と SAW の極間距離が十分に長く、2 溶融池でもつて溶接されるため、溶接入熱を分散し、1 溶融池当たりの入熱を低下して溶接金属の粗大フェライトの生成を抑制することができる。またこの溶接法は、溶接金属と HAZ の組織が粗大化して

靱性劣化を起こす約 1 000°C 以上の加熱時間が 3SAW に比べて半分以下にできること、及び L 極 MIG ビードが Ar₁ 変態点以下に冷却されたのち、後続の 2SAW による再熱効果が靱性に有効に作用することがわかつた。

(4) 鋼板表層寄りのシャルピーテストにおける MIG+2SAW 法の溶接金属の靱性は 3SAW と同等以上であるが、MIG+2SAW 法の板厚中央の靱性は 3SAW の靱性よりも優れており、2SAW の多層溶接金属と同等である。また 2MIG+SAW 法にして、MIG 溶着部分を増すと、板厚中央で著しい高靱性が得られる。

(5) HAZ の靱性は MIG+2SAW 法の方が 3SAW よりも高靱性が得られる。そのうちすべてが SAW 溶接金属に相当する板厚の外側、内側から試料採取した HAZ についても、MIG+2SAW 法は 3SAW と同等以上の靱性を示し、MIG に相当する板厚中央における HAZ は 3SAW の板厚中央よりも極めて良好な靱性が得られる。

文 献

- 1) 平林清照, 平 忠明, 市之瀬弘之: 溶接学会誌, 50 (1981) 4, p. 63
- 2) 高木乙磨: 溶接学会誌, 13 (1962) 6, p. 452
- 3) 藤森成夫, 斎藤 亨, 大谷幸三郎, 矢竹 丘, 長谷泰治, 常富栄一: 溶接学会講演概要 (1979) 24, S 166
- 4) 上垣達文, 美浦一彦, 小西博典, 歌橋千之, 他: 溶接学会講演概要 (1979) 25, S 276
- 5) G. TANAKA and I. WATANABE: Metal Construction, 9 (1977) 3, p. 114
- 6) 森 一美: 鉄と鋼, 46 (1960), p. 466
- 7) 越賀辰夫, 田中甚吉, 渡辺 之: 溶接学会講演概要, (1975) 16, S 136
- 8) 伊藤慶典, 中西睦夫: 第 69 回溶接学会溶接法研究委員会資料
- 9) K. HIRABAYASHI, T. TAIRA, T. YAMAGUCHI and K. TAKESHIGE: IIW-Doc. XII-A-135-77
- 10) 山口哲夫, 平 忠明, 平林清照: 溶接学会誌, 46 (1977) 9, p. 48
- 11) 平 忠明, 平林清照, 大須賀立美, 五代友和: 溶接学会誌, 46 (1977) 11, p. 14
- 12) 平林清照, 平 忠明, 市之瀬弘之: 溶接学会誌投稿中
- 13) 平林清照, 赤尾一孝, 平 忠明, 市之瀬弘之: 日本溶接協会, 第 33 回プラズマ分科会資料
- 14) 渡辺 之, 鈴木元昭, 平野 攻: 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S 283