ness of SMA Austenitic Stainless Steel Weld Metals
: Part II—Role of Nitrogen—, W. J., Vol. 58 (1979),
No. 2, 34s-44s

13) 池田, 高津, 新 “D308L 溶接金属の極低温衝撃特性におよぼす
フェライト量, N量の影響”, 溶接学会全国大会講演概要 No.
25 (1979)

炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタの発生*

荒井 敏夫**, 六条 正治**, 山田 忠昭**, 菅 哲男**

Spattering in CO₂ Arc Welding*

by Toshio Arai**, Masaharu Rokujyo**, Tadaaki Yamada** and Tetsuo Suga**

Spatter generation in CO₂ arc welding was investigated, using 1.2 mm solid wires with various chemical compositions. Correlation between the amount of spatter, measured by collection on a copper plate with a diameter of 1,200 mm, and the number of short circuit longer than 1 msec were investigated. Increase of manganese, silicon, selenium and titanium in wire decrease the amount of spatter, while carbon, aluminum and REM increase the amount of spatter. However, an excess of selenium increase the amount of spatter. Spatter generating process was classified into five groups, and it was concluded that the spatter in CO₂ welding was mainly caused by the explosive energy of the arc.

1. 緒 言

炭酸ガスアーク溶接は、自動・半自動化の波に乗って成長している溶接方法であり、その特徴は能率性と経済性にあるが、この方法の難点を強いてあげれば、スパッタの多い点である。

炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタの研究は、1960年代に入ってから始められた¹⁾。当初は、高速度写真を用い、スパッタの発生機構の解明に重点が置かれて研究された。その結果、種々の発生パターン^{2,3)}が観察され、ついで種々のスパッタ発生機構が提案された^{1,4)}。

その後、スパッタを減少させるため、電源⁵⁾や溶接材料⁶⁾への研究が行なわれるようになった。

1970年代以降になると、スパッタを定量的に測定するようになり⁷⁻¹⁰⁾、溶接条件によるスパッタへの影響が報告された。さらに、ワイヤの化学成分とスパッタ量に関する研究が行なわれ、益本ら¹¹⁾が、TiとREMに関して報告した。しかし、この種の研究は少なく、いまだ、未検討の部分が多いと思われる。

そこで、本研究では、ワイヤの化学成分とスパッタの発生に関して、系統的に調べるため、Ti, REMをはじめC, Si, Mn, Al, Seについて、各元素のスパッタに対する影響について調査した。

本研究においては、スパッタを粒度別に定量測定できる方法¹⁰⁾を用いると同時に、短絡回数¹²⁾の測定や高速度写真の影響も同時に行い、スパッタ発生機構に関する考察も行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

2.1.1 スパッタ捕集装置

スパッタ発生量を測定するには、アーク点から飛散するスパッタを捕集する必要があり、その捕集方法には、次の2つの方法が考えられる。一つは、アーク点を全面覆って、発生するスパッタを全量捕集する方法であり、もう一つは、発生するスパッタの一部を捕集して、全体を推定する方法である。

本研究では、スパッタ発生量を把握する上で、実験作業効率の高い後者を採用した。この測定は、スパッタ粒度の飛散距離の測定において、各粒度別の飛散量のピー

*原稿受付 昭和57年9月10日(昭和56年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 (株)神戸製鋼所 Member, Kobe Steel, Ltd.

Fig. 1 Apparatus for spatter collection

クが溶接点より 30 cm 以内にある¹⁰⁾ことから判断して、半径 60 cm のスパッタ捕集器を使用しているため、飛散するスパッタの大部分を捕集している。

本研究に用いたスパッタ捕集装置を Fig. 1 に示す。

この装置は、溶接機、スパッタ捕集器、試験板および台車より構成されている。スパッタ量の測定は、一定時間溶接後、スパッタ捕集器上に飛散落下したスパッタを集め、次に、篩分けした後に、各粒度ごとに重量を計測し、単位時間当りの発生量を求める方法をとった。

スパッタ発生量は、部分捕集であるため、絶対量で表示せず、基準ワイヤを 2.2 項に示す基準条件で溶接した場合を 100 として相対量で表示した。基準条件としてはスパッタの多く発生する条件を選んだ¹⁰⁾。

2.1.2 短絡回数の測定

炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタの発生は、短絡と深い相関をもっており、しかも、Fig. 2 に示すような瞬間的短絡時にもスパッタ発生があることを確認したので、瞬間的短絡数も含めて短絡回数を測定した。

本研究では、1 msec 程度の瞬間的短絡も測定できる

Fig. 2 Arc voltage wave pattern in CO₂ arc welding

Fig. 3 Block diagram of arc voltage short circuit counter

Fig. 3 に示すような装置を製作し、アークの出ている電圧から 10 volt 以上電圧降下したものを短絡とみなして短絡回数を測定した。

短絡回数も、スパッタ発生量と同様に、基準ワイヤを 2.2 項に示す基準条件で溶接した場合を 100 として相対量で表示した。

2.1.3 高速度写真

スパッタの発生状況及び溶滴移行現象は、高速度カメラを用い、背光法で観察した。撮影は 2,000 駒/秒で行いフィルムはモーション・アナライザーによって観察した。Table 1 に撮影条件を示す。

Table 1 Photographing condition

Item	Contents
Camera	HIMAC - 16HM (Hitachi)
Lamp	5Kw Xe Lamp
Maximum picture speed	2000 p.p.s.
Lens	f = 135mm (52mm ϕ)
Filter	ND 8 : ND 4 : R50 : L35
Extension tube	K 1 - K 2 - K 3 - K 4 - K 5 - K 6 - K 7
Iris	22
Film	1224 - 4XN430 (Kodak)
Photographing arrangement	

2.2 供試ワイヤおよび溶接条件

供試ワイヤは Table 2 に示すように、JISZ 3312 の YCW-2 を基準にして、基準ワイヤ中の 3 つの元素 C, Mn, Si を変化させたものと基準ワイヤに Ti, Al, RE M, Se を添加したワイヤを用いた。ワイヤ径はすべて 1.2 mm で、基準の溶接条件として、溶接電流 280 A, アーク電圧 29 V, 溶接速度 30 cm/mm, ワイヤ突出し長さ 20 mm, トーチ角度垂直, ガス流量 20 l/min を用いた。

3. 実験結果

3.1 スパッタ発生量、粒度分布及び短絡数に及ぼす成分元素の影響

3.1.1 C の影響

C の影響を Fig. 4 に示す。C 量が増加するとスパッタ量は増加する。C 量が 0.10 wt% 以上になるとスパッタ量の増加が顕著になり、短絡数も増加する。

一方、スパッタの粒度構成を調べると Table 3 に示す

Table 2 Chemical composition of test wires

Element Wire No.	C	Mn	Si	P	S	Ti	Al	REM	Se
1	0.043	1.39	0.78	0.013	0.008	-	-	-	-
2	0.050	1.45	0.67	0.007	0.012	-	-	-	-
3	0.080	1.40	0.80	0.010	0.010	-	-	-	-
4	0.090	1.45	0.81	0.015	0.011	-	-	-	-
5	0.098	1.44	0.80	0.015	0.010	-	-	-	-
6	0.15	1.45	0.80	0.019	0.013	-	-	-	-
7	0.19	1.49	0.82	0.022	0.014	-	-	-	-
8	0.27	1.52	0.85	0.028	0.021	-	-	-	-
9	0.22	1.07	0.65	0.030	0.012	-	-	-	-
10	0.20	1.63	1.26	0.035	0.013	-	-	-	-
11	0.10	1.27	0.87	0.004	0.008	-	-	-	-
12	0.096	1.46	0.87	0.004	0.008	-	-	-	-
13	0.095	1.59	0.85	0.004	0.008	-	-	-	-
14	0.097	1.38	0.65	0.004	0.008	-	-	-	-
15	0.096	1.46	0.87	0.004	0.008	-	-	-	-
16	0.090	1.47	1.02	0.004	0.008	-	-	-	-
17	0.078	1.50	0.85	0.004	0.008	0.022	-	-	-
18	0.070	1.50	0.81	0.004	0.008	0.066	-	-	-
19	0.074	1.56	0.88	0.004	0.007	0.24	-	-	-
20	0.071	1.56	0.89	0.004	0.007	0.32	-	-	-
21	0.16	1.46	0.86	0.008	0.012	-	-	-	-
22	0.16	1.51	0.87	0.008	0.012	0.030	-	-	-
23	0.16	1.50	0.85	0.008	0.012	0.068	-	-	-
24	0.16	1.55	0.92	0.008	0.011	0.23	-	-	-
25	0.15	1.55	0.90	0.008	0.009	0.31	-	-	-
26	0.16	1.58	0.93	0.008	0.011	0.36	-	-	-
27	0.090	1.32	0.86	0.005	0.009	-	0.11	-	-
28	0.090	1.33	0.84	0.005	0.008	-	0.31	-	-
29	0.090	1.40	0.88	0.005	0.009	-	0.93	-	-
30	0.097	1.25	0.77	0.011	0.007	-	-	0.006	-
31	0.094	1.24	0.77	0.010	0.007	-	-	0.015	-
32	0.082	1.25	0.77	0.011	0.006	-	-	0.029	-
33	0.085	1.25	0.77	0.013	0.006	-	-	0.052	-
34	0.073	1.23	0.79	0.010	0.009	-	-	-	0.011
35	0.078	1.30	0.86	0.011	0.010	-	-	-	0.014
36	0.080	1.31	0.84	0.010	0.012	-	-	-	0.058
37	0.073	1.29	0.78	0.010	0.012	-	-	-	0.090

Fig. 4 Effect of carbon content

ように、C量を上げると細粒のスパッタは増加するが、粗粒のスパッタは逆に減少する傾向にある。

3.1.2 Mn 及び Si の影響

Mn あるいは Si がスパッタに影響を及ぼすことは、Fig. 4 の中にも示されている。すなわち、図中のワイヤ No. 7, 9, 10 に示されるように、C量がほぼ同一レベルでは Mn, Si 量が高くなるとスパッタが減少し、逆に、少なくなるとスパッタ量が増加する。

次に、C量が 0.09~0.10 wt% において、Mn 及び Si

Table 3 The relation between amount of added element in wire and particle size distribution

added element	Wire No.	amount of added element (wt%)	diameter of spatter (μ)		
			590 over	590-149	149 under
Carbon	1	0.04	14.0	60.2	25.8
	3	0.08	13.6	59.2	27.2
	6	0.15	10.2	61.6	28.2
	7	0.19	9.1	60.5	30.4
	8	0.27	8.7	56.3	35.0
	14	0.65	13.4	65.5	28.2
	15	0.87	14.2	58.2	26.0
	16	1.02	13.1	57.7	25.4
Si	11	1.27	13.9	59.5	26.4
	12	1.46	14.2	58.2	26.0
	13	1.59	14.6	57.7	25.9
Mn	3	tr	13.6	59.2	27.2
	17	0.022	14.0	59.1	26.9
	18	0.066	16.7	57.4	25.8
	19	0.24	17.3	58.4	24.3
	20	0.32	19.8	56.4	23.8
	3	tr	10.0	62.2	27.8
	23	0.058	9.2	59.4	31.2
	24	0.23	10.8	58.2	31.0
	25	0.31	13.5	59.1	27.3
	26	0.36	13.4	57.6	28.9
	3	tr	13.6	59.2	27.2
	27	0.11	15.0	58.9	25.7
Al	28	0.31	11.6	61.5	26.8
	29	0.93	14.4	59.5	26.1
REM	3	tr	13.6	59.2	27.2
	30	0.006	15.9	58.9	25.2
	31	0.015	77.3	16.5	6.2
	32	0.029	82.7	12.7	4.6
	33	0.052	79.8	16.0	4.1
Se	3	tr	13.6	59.2	27.2
	34	0.011	14.8	59.7	25.5
	35	0.014	16.1	57.3	26.6
	36	0.058	13.4	59.0	27.6
	37	0.090	13.8	58.2	28.0

の各々の効果について調べた結果を、Fig. 5 及び Fig. 6 に示す。ここに示されるように、Mn と Si はともにスパッタを減少させる傾向をもつが、Si は Mn に比較して、スパッタを減少させる効果の大きいことを示している。

一方、粒度構成に関しては、Table 3 に示すように、Mn, Si 量による影響は少ない。

3.1.3 Ti の影響

Ti の添加は Fig. 7 に示すようにスパッタを減少させ

Fig. 5 Effect of manganese content

Fig. 6 Effect of silicon content

Fig. 7 Effect of titanium content

る効果が大きく、同時に、短絡数も著しく減少させる。しかし、C量によって、多少違いが認められる。すなわち、C量が低いときは、スパッタおよび短絡数に対するTiの効果は約0.1 wt% でほぼ飽和状態になるが、C量が高くなると、Ti量が低い場合は、Cの効果が支配的になり、スパッタおよび短絡数が多く、Ti量が増加するとスパッタ量はC量の低い場合より減少する。また、短絡数はC量の低い場合の飽和値に近づく。

一方、粒度構成に対する影響はTable 3に示すごとく、Tiの添加によって、粗粒のスパッタが増加する傾向を示す。しかし、C量が高い方が低い場合に比較して、粗粒の量が少ない。

3.1.4 Alの影響

Alの添加についてFig. 8に示すように、スパッタは増加する傾向を示す。しかし、短絡数は0.3 wt% までは多少増加するが、それ以上では減少する。また、数度構成についてTable 3に示すように顕著な差が認められ

Fig. 8 Effect of aluminium content

ない。

3.1.5 REMの影響

REMの添加はFig. 9に示すように、スパッタ量を著しく増加させ、短絡数を減少させる。

粒度構成はTable 3に示すように、REMの添加によって非常に粗粒になり、逆に、細粒のスパッタは極端に少なくなる。

3.1.6 Seの影響

Seの添加は極微量で効果を示し、0.05 wt% 以下では、Fig. 10に示すようにスパッタは多少減少するが、0.05 wt% 以上添加するとスパッタ量は急激に増加する。一方、短絡数は0.05 wt% 以下では変化しないが、

Fig. 9 Effect of rare earth elements content

Fig. 10 Effect of selenium content

0.05 wt% 以上では、スパッタ同様、急激に増加する。

粒度構成については、Table 3 に示すように顕著な変化は認められない。

4. 考 察

4. 炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ発生形態主因の推定

炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ発生形態は、本研究の溶接条件下では、Fig. 11¹²⁾ に示すように、従来報告されているタイプ³⁾ にアーク時の変動によるタイプ 3 が加わったものである¹²⁾。

Fig. 11 Types of spatter generation mechanism in CO₂ arc welding¹²⁾

タイプ 3 においては、アーク期間中に極く単時間 (0.02~2 msec) にアーク電圧の変動が観察されると同面に、溶滴下端部が上向きの力を受ける。そのため、溶滴全体が激しく上昇運動をするとともに、クレータも下向に強い押しつけ力を受ける、このとき、溶滴及びクレータの一部がスパッタとなって飛び出していく。

スパッタ発生量と短絡数の相関を調べた結果、Fig. 12 に示すように、REM と Al を除いて、スパッタ発生量は短絡数に比例し、短絡数が増加するとスパッタ量も増加していることが判明した。このことより、短絡に係のあるスパッタ発生機構はタイプ 1 であり、これがスパッタ発生の主因であると考えられる。このことは、高速度フィルムの観察からも、タイプ 1 の発生頻度が著しく高いことで裏付けられる。

Fig. 12 Spatter plotted against short circuit

一方、スパッタ発生量と短絡数の比例関係からずれてる元素としては、REM 及び Al がある。REM に関しては、Table 3 に示すようにスパッタの粒度構成が他の元素と異なる、すなわち、REM を添加すると、スパッタ粒は著しく粗くなっており、高速度写真の観察結果より溶滴そのものがアーク力で吹き飛ばされるタイプ 4 が支配的であることを示している¹²⁾。また、Al に関しては、高速度写真の観察結果より、タイプ 1 がスパッタ発生の主因であることを確認した。Al の添加量を上げていくと短絡数が減少するにもかかわらず、スパッタが増える傾向にあり、短絡一回当りに発生するスパッタ量が増加したものであろう。

4.2 ワイヤの化学成分と短絡数の関係

ワイヤの化学成分と短絡数の関係は以下のようなものである。Fig. 12 は溶接電流とアーク電圧を一定した場合の関係であり、一方、溶接電流を一定して、アーク電圧を変化させた場合を Fig. 13 に示す。このように、添加元

Fig. 13 The relation between arc voltage and number of short circuit

素やアーク電圧で短絡回数が増える理由として、アーク長と相関¹³⁾のあることが示唆されている。

ここでは、アーク長と短絡回数の関係を調べるため、C, Mn, Si, Ti, Al について、再アーク後のアーク発生時の最大アーク長を横軸にとり、基準ワイヤのアーク長を 100 として、縦軸には、基準ワイヤの短絡数を 100 とすると Fig. 14 のようになり、アーク長と短絡数はほぼ反比例的な関係にあることを裏付けている。しかし、Fig. 14 において、ある程度のバラツキがあることから、アーク長以外にも短絡回数を支配している因子のあることが推定される。その因子としては、表面張力、アーク力、スラグの蒸発力¹⁴⁾および CO ガス圧力等¹⁵⁾が挙げられるが、これらについての正確なデータがないので、現段階では、その寄与関係が明確ではなく、今後の研究に期待されるところである。

Fig. 14 The relation between arc length and short circuit arc length

5. 結 言

炭酸ガスアーク溶接用ワイヤの化学成分とスパッタの関係およびスパッタの発生機構を調べた。得られた結果を以下に示す。

1) スパッタ量は、ワイヤ中の Mn, Si, Ti の増加、及び C, Al, REM の減少によって、低減する傾向にある。ただし、Sc の過大増加は、スパッタ量を逆に増大する。

2) 本研究の範囲では、スパッタの発生形態には 5 つのパターンがあるが、主因は、短絡後、再アーク時に発生するタイプ 1 である。しかし、REM は例外であり、アークの反撥力によって溶滴そのものが飛びだすタイプ 4 が主因である。

参 考 文 献

- 1) 浮田, 信原, 小林, 万木, 河江, “高速度写真による MIG 溶接現象に関する研究 (第 5 報) CO_2 - O_2 ガスアーク法の溶接現象”, 溶接学会誌 30 (1961) 44~48
- 2) 安藤, 山本, “炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタについて (第 1 報, 第 2 報)”, 溶接学会誌講演概要 31-3 (1962) 218~219
- 3) 安藤, 長谷川, “溶接アーク現象”, 産報 (1962), 288-293
- 4) N.F. Medvedenk, “The reason for metal spatter occurring when CO_2 welding is accompanied by short-circuiting”, svar. proix 5 (1969), 14-15
- 5) P.D. Lewis, “Effect of inductance on spatter loss in the CO_2 shielded welding of mild steel”, Apr. (1964), 157-162
- 6) Everett Cushman, “Electrode for spatter-for welding of steel in carbon dioxide”, welding research supplement Jan. (1961), 14s~21s
- 7) A.G. Potapévskii, V. Ya. Lavrishcher, “Spatter when CO_2 welds are made with Sv-08G2S were”, Avt. Svar. 8 (1972), 34~42
- 8) N.M. Voropal, V. Ya. Lavrishcher, “Conditions of electrode metal transfer in CO_2 welding”, Avt. Svar. 5 (1976), 8~11
- 9) 竹内, 洞田; MAG 溶接の溶接作業性と継手性能に及ぼすシールドガス組成の影響”, 大同技報 51-1 (1980)
- 10) 山田, 六条 “ CO_2 アーク溶接におけるスパッタの発生 (溶接条件およびシールドガス組成の影響とスパッタの性状)”, 神戸製鋼技報 31-4 (1981) 69-72
- 11) 益本, 関口, 川崎, “effect of titanium in steel electrode wire for CO_2 arc welding on the usability and mechanical properties of weld metal”, IIW. Loc. XII-B-135-73 (1973)
- 12) 荒井, 六条, 山田, 菅 “炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタの発生” 第 86 回溶接冶金研究委員会資料 (1981)
- 13) 小林, 桑名, 武田, “アーク現象に及ぼす鋼線の組成の影響” 第 45 回アーク物産委員会資料 No. 76-324 (1976)
- 14) 渡辺, 鈴木 “溶滴移行形態のアーク電圧依存性に関する一考察” 第 53 回溶接アーク物理研究委員会資料 No. 78-391 (1978)
- 15) 宇田, 大野 “化学冶金的にみたスパッタリング現象”, 溶接学会誌 44-10 (1975) 799-806