軟鋼溶着金属の切欠靱性に及ぼす合金元素の影響 (第5報)*

— 燐 の 影 響 —

榊 鳳 千 代**

Effect of Alloying Elements on Notch Toughness of
Basic Weld Metals (Report 5)*

—Effect of Phosphorus—

By H. Sakaki**

Abstract

Phosphorus has strong tendency to form segregated structure in weld metals and coarsens ferrite grain size by forming the untransformed α phase.

Silicon and aluminium were used as deoxidizer in this experiment.

In higher silicon and aluminium contents, the transition temperature begins to increase at the lesser contents of phosphorus.

Table 1 Chemical Composition of Weld Metals

45% Fe-Si	25% Fe-P	Charge No.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% N	% O	% Al
12	0.5	IP-1	0.048	0.085	0.490	0.061	0.009	0.014	0.051	
	1.0	2	0.049	0.078	0.459	0.094	0.010	0.016	0.054	
	1.5	3	0.046	0.090	0.452	0.142	0.100	0.016	0.057	
	2.0	4	0.050	0.086	0.483	0.198	0.008	0.015	0.047	
	2.5	5	0.049	0.086	0.475	0.260	0.010	0.014	0.046	
9	0.5	7	0.032	0.052	0.226	0.050	0.010	0.014	0.094	
	1.0	8	0.031	0.060	0.226	0.086	0.011	0.013	0.093	
	1.5	9	0.031	0.062	0.210	0.120	0.010	0.015	0.099	
	2.0	10	0.033	0.054	0.210	0.172	0.011	0.015	0.096	
	2.5	11	0.034	0.056	0.218	0.208	0.010	0.014	0.101	
	3.0	12	0.038	0.054	0.202	0.270	0.012	0.016	0.099	
75% Fe-Al	25% Fe-P	Charge No.	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% N	% O	% Al
10	0	IP-25	0.032	0.067	0.160	0.016	0.010	0.013	0.053	0.053
	0.5	26	0.052	0.057	0.139	0.048	0.010	0.015	0.063	0.053
	1.0	27	0.043	0.075	0.148	0.090	0.011	0.014	0.060	0.047
	1.5	28	0.043	0.059	0.132	0.124	0.010	0.017	0.061	0.046
	2.0	29	0.039	0.054	0.151	0.151	0.010	0.016	0.059	0.039
	2.5	30	0.045	0.062	0.139	0.179	0.009	0.010	0.051	0.054
12	0	IP-48	0.059	0.052	0.438	0.011	0.008	0.007	0.044	0.102
	0.5	49	0.057	0.049	0.429	0.056	0.008	0.007	0.035	0.117
	1.0	50	0.077	0.048	0.424	0.097	0.009	0.006	0.044	0.086
	1.5	51	0.059	0.047	0.405	0.136	0.007	0.007	0.039	0.079
	2.0	52	0.064	0.047	0.386	0.178	0.012	0.007	0.042	0.109

* 原稿受付, 昭和34年12月2日 (昭和34年度溶接学会秋季学術講演会において発表)

** 正員, K K 神戸製鋼所 Member, Kobe Steel Works Co., Ltd.

1. 緒 言

燐は硫黄と同じく鋼に悪影響を及ぼすが, 燐は硫黄と異なりある程度フェライト中に固溶体として入りその地を固

く脆くする作用がある。ことに磷は偏折しやすい性質がありまた炭素とは互いに反撥し合い、磷の豊富な部分は炭素が少くなり、焼鈍に際しオーステナイトにならぬ部分が残ります。そのため結晶粒が微細化されず粗大組織になり易い。これらはいずれも靱性に悪影響を与える。

今回の実験において溶着金属中に磷を入れるために磷化鉄を Flux の中に混入した。溶接棒の被覆型は従来と同じ石灰一螢石型である。

2. 実験方法

被覆棒の脱酸剤としてアルミニウムと珪素の 2 種を使用した。Flux の基本成分は第 3 報¹⁾と同じく石灰 48 parts, 螢石 18 parts, ジルコン砂 5 parts, Mica 4 parts で脱酸剤の 45% Fe-Si, 75% Fe-Al の量は Table 1 の如くである。溶着金属中の磷の量を変化せしめるために 25% 磷化鉄の量を Table 1 のごとく変化せしめた。

心線は低炭素、低マンガンリムド鋼でマンガンの影響を極力排除するように留意した。

溶接条件や試験法は従来のもものと同一である。

3. 溶着金属の化学組成

Table 1 に溶着金属の化学組成を示す。同一の磷化鉄を

Table 2 Tensile Strength of Weld Metals

Charge No.	Element varied % P	Yield strength kg/mm ²	Tensile strength kg/mm ²	Elongation (50mm)%	Reduction %
IP-1	0.061	37.1	48.9	33.0	65.9
2	0.094	38.3	51.0	31.0	59.1
3	0.142	38.7	51.5	30.4	65.9
4	0.198	37.4	50.0	30.8	55.0
5	0.260	33.9	37.6	—	0
IP-7	0.050	32.6	44.8	34.2	60.0
8	0.086	34.7	46.6	34.0	65.8
9	0.120	35.5	47.8	33.0	63.0
10	0.172	37.2	49.5	30.4	54.8
11	0.208	35.9	49.5	30.8	56.9
12	0.270	34.1	46.5	10.0	9.3
IP-25	0.016	36.0	44.8	31.5	72.1
26	0.048	36.1	45.3	35.7	71.4
27	0.090	36.8	46.5	32.0	69.6
28	0.124	38.3	48.9	33.2	59.1
29	0.151	36.1	46.8	37.3	66.9
30	0.179	35.7	47.2	37.0	66.9
IP-48	0.011	36.4	45.9	36.3	69.5
49	0.056	34.6	46.3	33.0	69.5
50	0.097	37.2	47.9	33.5	69.5
51	0.136	37.1	48.0	17.0	36.1
52	0.173	35.9	47.9	19.5	36.0

入れた場合珪素、アルミニウム両系列とも溶着金属中の磷の含有量は脱酸剤の多い系列のほうが高くなっている。

珪素の系列では 45% Fe-Si 12 parts の系列のほうが 9 parts のものより同一磷化鉄の添加で溶着金属中の磷は高くなり酸素量は 0.095% に対し 0.05% と低くなっている。また当然ながら珪素量は 0.22% に対し 0.47% となる。

アルミニウムの系列でも同様であり 75% Fe-Al 12 parts の系列のほうが 10 parts の系列より同一量の磷化鉄の添加で溶着金属中の磷の量は高くなる。同時にアルミニウム量も高くこれにより還元せられる珪素量も高くなる。酸素量は反対に低下する。

アルミニウムのほうが珪素より脱酸する能力は大きく、アルミニウム脱酸で Fe-Al 10 parts の系列では Fe-Si 9 parts の系列よりは珪素量が低いにもかかわらず酸素量は少ない。

4. 溶着金属の機械的性質

Table 2 は溶着金属を 620°C に焼鈍し引張った値を示している。両系列とも降伏点、抗張力は溶着金属中の磷の増加とともに高くなる。しかし 0.15% を超えるとふたたび低下をする。伸び、絞りも磷の増加とともに徐々に低下するが 0.2% P までは伸びは 20% 以上を示す。0.2% P 以上は急激に靱性を失う。

珪素脱酸の系列では 0.2% P までは伸びは 30% 以上、絞りは 50% 以上であるが Fe-Si 12 parts の系列では 0.26% P で絞りはなくなり、9 parts では 0.27% P で絞りは 9% となる。

Fig. 1 Fractured appearance of tensile specimens

Fig. 2 Distortion of ferrite grain size (nital etch) $\times 100$

Fig. 3 Typical segregated phosphorus enriched parts (etched by stead's reagent) $\times 150$

アルミ脱酸では Fe-Al 10 parts の系列は 0.18%P で伸びは 37%, 絞りは 67%を示すが, Fe-Al 12 parts では伸び 20% 絞り 36%となり, 酸素量の少いほうが却って悪い結果を示している。

Fig. 1 は引張試験片の外観写真で燐の増加とともに絞りの減少する状況がよく出ている。

IP-5 と IP-12 では完全に靱性を失っている。また燐の増加とともに各系列で局部収縮部に引張方向に皺がよっているのが見える。

5. 溶着金属の顕微鏡組織

引張試験片の残材より円筒部を切出しその横断面を研磨し nital etch して燐の多い偏析部を見たのが Fig. 2 である。この部分は次の Bead で焼鈍され結晶が微細化したものであるが、溶着金属中に燐が多くなると $\gamma + \alpha$ の 2 相²⁾の領域に高温の場合はいり変態をしない部分が粗大なフェライト相として残る。これが図の細長く伸びた部分である。この未変態のフェライト相に燐が rich となり中心部は白く光っている。nital etch ではわかりにくいので stead の試薬で etch したのが Fig. 3 である。図で etch されない白色部が燐の rich な部分でデンドライト状に長く伸びている。この燐の rich な部分の平行的に伸びる方向はもちろん凝固する方向と一致している。

Fig. 4 は 300 倍に拡大した溶着金属のミクロ

Fig. 4 Microstructure of weld Metals ($\times 300$)

Fig. 5 (1) Effect of phosphorus on the energy-temperature relationship

Fig. 5 (2) Effect of phosphorus on the energy-temperature relationship

組織で珪素脱酸, アルミ脱酸とも燐の増加とともに結晶粒の形状が乱れ, 大きさが不向になってくる。

焼鈍部のフェライト粒度は燐の増加とともに若干大きな傾向があり, 未変態のフェライト相が増加する。また未焼鈍部は燐の偏析に沿ってフェライトは細長く伸びた形状を呈しやすくなる。

6. 溶着金属の衝撃値

シャルピー試験片は 10 mm 角の断面で溶着金属中央部

に板厚方向に付した深さ 2mm の V-notch である。試験片は熱処理を施さず溶接のままで行った。試験温度は -60°C より $+60^{\circ}\text{C}$ まで 20° 間隔で行った。

Fig. 5 (1) は珪素系列のエネルギー曲線を示している。両系列とも溶着金属中の燐の増加するに従い最高エネルギーは低下し遷移温度は上昇している。最高エネルギーは珪素 0.47% の系列のほうが始めは高いが燐の増加とともに急激に減少する。0.05% P 以上は普通高温にて α と γ の Duplex 組織になりやすいので燐が多くなると燐の rich な変態しない α の部分が多くなり衝撃値に悪影響を及ぼす。Fig. 5 (1) では両系列の差はよく出ていないが、Fig. 6 の上図の Fibrosity-温度曲線では珪素 0.47% の系列の方が同一燐量では珪素 0.21% の系列より遷移温度は高くなっている。

Fig. 5 (2) はアルミニウム脱酸の場合の energy-温度曲線を示しているが、Al 0.1%, Si 0.4% の系列は Al 0.05%, Si 0.15% の系列より燐の少ない間は最高エネルギーも高く遷移温度も低くなっているが燐の量が高くなるに従い反対に最高エネルギーは低く遷移温度も同一燐量では高くなる。

Fig. 6 の下図はこの系列の Fibrosity-温度曲線であるが energy と同様、脱酸度の強い系列は同一燐量では始め遷移温度は低くなっているが燐が高くなると反対に遷移温度は高くなる。

Fig. 7 は両系列の Tr_{15} に及ぼす燐の影響、Fig. 8, 9 は 10% Fibrosity および Tr_s に及ぼす珪素脱酸, アルミ脱酸における燐の影響を図示している。

Fig. 7 において Al 0.1% の系列が Tr_{15} の急激に上昇を始める燐の値が最も少ない。これはアルミニウムの増加による変態しないフェライト部の増加に関連している。

珪素脱酸における燐の影響は Tr_{15} よりも Fibrosity の遷移温度に及ぼす場合のほうが明りようである。Fig. 8 において 0.21% Si の系列よりも 0.47% Si の系列のほうが燐のより少ない含有量で Tr_s も 10% Fibrosity より求めた遷移温度も急激に上昇を始める。この場合も珪素量の増加によって燐の rich な未変態のフェライト相の増加によるものである。

Fig. 6 Effect of phosphorus on the fibrosity-temperature relationship

Fig. 7 Effect of phosphorus on energy transition temperature

Fig. 8 Effect of phosphorus on fibrosity transition temperature in silicon deoxidation

Fig. 9 Effect of phosphorus on fibrosity transition temperature in aluminium deoxidation

Fig. 9 はアルミニウム脱酸の場合で珪素脱酸の場合と同様アルミニウムの多い 0.1%Al の系列のほうが磷の増加せしめてゆくと早く遷移温度の上昇が始まっている。

Fig. 10 は珪素脱酸の場合の衝撃試験片の破面の外観写真であるが、各系列とも磷の増加とともに脆性破面の開始が高温側に移動している。その傾向は 0.47% Si のほうが著しい、Fig. 11 のアルミ脱酸も同様 0.1%Al のほうが磷量による脆性破面の開始の温度の急激な上昇が認められる。

またいずれも脱酸量の多いほうが未変態の磷 rich のフェライト相が多くなり結晶粒が粗大になってくる。

以上を要約すると珪素脱酸においてもまたアルミ脱酸においても、珪素量、アルミニウム量の増加とともに磷の増加による $\alpha + \gamma$ の 2 相の領域に早く到達し磷の rich な未変態のフェライト相を生ずることにより靱性を低下せしめる。また両者を比較した場合アルミニウムの影響がさらに

Fig. 10 Fractured appearance of Charpy specimens in silicon deoxidation

大きいことが認められた。

7. 結 論

以上の結果をまとめると次のようになる。

(1) 溶着金属中の磷含有量は同一の磷化鉄の添加で珪素、アルミの両脱酸とも脱酸剤の多い系列が高くなる。

(2) 溶着金属の抗張力、降伏点は磷含有量の増加とともに高くなるが約 0.15%P よりふたたび低くなる。0.2%P を超えると急に靱性を消失する。

(3) 磷は溶着金属中に偏析部を作り易く、未変態のフェライト部の増加でフェライト粒の分布は著しく乱れ大き

Fig. 11 Fractured appearance of Charpy specimens in aluminium deoxidation

さも異なる。

(4) 磷は 0.12% 程度までは遷移温度 (Tr_{15}) に大きな影響はないがそれを超すと急激に上昇せしめる、Fibrosity による遷移温度については珪素、アルミ脱酸とも脱酸剤の多い系列では磷のより低い値で急激に上昇を始める。

文 献

- 1) 榊, 溶接学会誌, Vol. 29 (1960), p.539~544
- 2) Hopkins & Tipler, J.I.S.I., Vol. 188 (1958), p.218~237