UDC 669. 187. 046. 58 ESR

669. 14. 018. 821 : 669. 15'26-194. 55

エレクトロスラグ再溶解したマルテンサイト系 ステンレス鋼の諸性質について

山口 国男*・藤川 峻一*

Some Properties of Electroslag Remelted Martensite Type Stainless Steels

Kunio Yamaguchi and Shun-ichi Fujikawa

Synopsis

Some properties of martensitic stainless steel such as SUS 410 and 440C were investigated by electroslag remelting.

The special features of electroslag remelted material are as per described hereunder and the material was found to be by no means inferior to VAR material.

- (1) After electroslag remelting the steel becomes such a pure steel with few non-metallic inclusion.
- (2) Elongation and reduction of area out of mechanical properties are improved.
- (3) The hot workability is excellent.
- (4) Good decarburizing composition can be obtained if moderate selection of each ingot size is made.

1. 緒 言

エレクトロスラグ再溶解法、(以下ESR法と略す)の歴史はかなり古く1937年に始まるが、わが国に紹介され、試験的に溶解が開始されたのは10数年前である。その後真空アーク再溶解法(以下VAR法と略す)の発達で進展が一次頓座したが、数年前からソ連を中心にして工業的規模の炉での溶解法および溶解材の特長が公表され、それ以後急速に発展をし、1971年には世界最大の160 t 炉が西独で稼動¹⁾を始めた。いっぽうわが国では1972年に10数基の炉が稼動している。

溶解法については、既に数多くの報告があり^{2)~4)}本誌⁵⁾にもすでに紹介されている。大同製鋼でも渋川工場に昭和46年4月に生産規模の多目的炉を設置し、

テストならびに生産を続けており、その効果について調査を進めてきた。今回は各種の特殊鋼の品質調査のうち、ステンレス鋼、特にマルテンサイト系 Cr ステンレス鋼に適用した場合の材質の特長について報告する。

ステンレス鋼は大別してフェライト系、マルテンサイト系、オーステナイト系に分類されるが、従来から高品質を要求され製造上問題のあるのは前2者であり特にマルテンサイト系 Cr ステンレス鋼は大気溶解では品質のバラツキが大きく、タービンブレードなど高い信頼性を要求される材料にはVAR法が適用されてきた。

いっぽうESR法が進歩するにつれて、既に諸誌にも発表されているように、VAR法に比べて経済性、品質上の優位性などにより、VAR法に代わりつつあり、今後も転換のピッチは増加すると思われる。本調査の一部は真空アーク再溶解材との比較も行っている。

昭和47年10月1日受付

*大同製鋼(株)渋川工場

2. 装置および使用鋼塊寸法

装置は **Photo. 1** に示す，大同一レイボルト・ヘラッス式 2 t ESR 炉を用い，つぎの寸法の鋼塊を溶製し試験に供した。

Photo. 1. General view of 2t ESR furnace.

280kg鋼塊	230mmφ × 900mmℓ
700kg鋼塊	310mmφ × 1200mmℓ
1800kg鋼塊	460mmφ × 1450mmℓ

鋼塊は **Photo. 2** に示す如く，美麗な鑄肌で，溶解後直接次工程の鍛造あるいは圧延に送ることができる。しかし，VAR再溶解と異なり，マルテンサイト系ステンレス鋼のESR鋼塊は変態応力による割れなどの問題があり次工程までの熱的取扱については十分な注意を払う必要がある。

Photo. 2. Appearance of ESR ingot surface.

3. エレクトロスラグ再溶解材の性質

3.1 12% Cr ステンレス鋼（SUS410）

Table 1 に供試材の化学成分を示す。

Table 1 でわかるように ESR 材は脱硫効果により S が低いことが特長であり，VAR 材の Mn および Cu のように大きくバラツキを生じたり，大幅に変化をする元素はない。

3.1.1 マクロ組織

Photo. 3 に ESR 材と VAR 材のマクロ組織を示す。マクロ組織を比較すると ESR 材は VAR 材より欠陥が少なく良好な組織である。ESR 材のマクロ組織の特長は脱硫効果と介在物の分散効果のため腐食ピットの少ない，耐食性の良好なことである。しかしいっぽう ESR 材には **Photo. 4 (a), (b)** に示すように δ-フェライトの発生が他の溶解法に比し顕著であり，十分ソーキングをし消滅させ，その後の熱間加工温度にも注意して，再析出させないようにする必要がある。

3.1.2 焼入焼もどし後のミクロ組織

Photo. 5 に 950°C × 1 hr O. Q 後 720°C × 2 hr AC したミクロ組織を示すが，偏析の少ない均一なソルバイト組織であることがわかる。

3.1.3 非金属介在物

Fig. 1 に比較材（AF 溶解材）と VAR 材と ESR 材の非金属介在物の JIS による測定結果を示す。

図でわかるように，A 系は ESR 材の方が少なく，C 系は VAR 材の方が少ない。また，最近 VAR 材などには JIS 法でなく，ASTM-D 法で測定される

Table 1. Chemical composition of 12% Cr steel.

	(%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
Pole before ESR	0.13	0.38	0.69	0.026	0.009	0.08	0.41	11.62
Ingot after ESR	0.13	0.36	0.67	0.025	0.005	0.08	0.42	11.58

Pole : Ladle sample Ingot : Middle part

(a) Conventional steel

(b) ESR steel

Photo. 3. Macrostructure of 12% Cr steel.

(a) Macrostructure of 12% Cr steel with etch pit defect.

(b) Microstructure of etch pit part.

Photo. 4. Macrostructure of 12% Cr steel with etch pit defect.

結果が多く、Table 2 に同法での測定結果を示しておく。比較材は参考のため ASTM-D 法で測定した結果である。

3.1.4 地きず

55mmφ 圧延材の蛍光磁探による 3 段地きず検査の結果を Table 3 に示す。また、地きず検査結果の各段の地きず総長のヒストグラムを Fig. 2 に示す。E

SR 材は VAR 材に比較して地きずの発生率ですぐれていることがわかる。これはすでに諸誌⁶⁾に発表されているように介在物の微細化効果によるものと思われる。

3.1.5 機械的性質

Fig. 3 に比較材、VAR 材、ESR 材の機械的性質を示す。同一チャージでないため若干の相違はある

Table 2. Non-metallic inclusions by ASTM-D method.

Type Method of production	A		B		C		D	
	T	H	T	H	T	H	T	H
Conventional	2.5	1.0	2.0	1.0	0	0	2.0	1.5
V A R	1.5	0	0	0	0	0	1.0	1.0
E S R	1.0	0	1.5	0	0	0	1.5	1.0

Photo. 5. Microstructure of tempered 12% Cr steel.

Fig.1. Diagram of inclusion contamination of 12% Cr steel.

が、E S R材の特長はV A R材の場合と同様で伸び、絞り、衝撃値の改善効果が認められる。今回は縦方向と横方向の機械的性質の差—すなわち異方性については調査をしていないが、構造用鋼で調査した結果⁷⁾では他の溶解法に比較して少なく、E S R法の大きなメリットの一つであることが確認できた。

Fig. 4 は熱間における機械的性質のデータで

Table 3. Results by sand mark inspection.

Method of production	Grade No.	0.5	1	2	2	3	3	4 up
		Length mm 0.1 ~0.5	Length mm 0.5 ~1.0	Length mm 1.0 ~1.5	Length mm 1.5 ~2.0	Length mm 2.0 ~2.5	Length mm 2.5 ~3.0	Length mm > 3
Conventional (A F)	1 79×63.6	2	1	0	0	1	0	0
	2 56×63.6	2	1	1	0	0	0	0
	3 42×63.6	1	1	2	0	0	0	0
E S R	1 49.9×63.6	0	0	0	0	0	0	0
	2 35.3×63.6	0	0	0	0	0	0	0
	3 26.5×63.6	0	0	0	0	0	0	0

Fig.2. Frequency diagrams of total sand mark length.

V A R材と同等の傾向を示している。

以上一般的な性質について報告したが、E S R材の特長である非金属介在物の減少の基礎となる脱硫，脱酸効果について付記してみた。

3.1.6 E S Rによる脱硫，脱酸効果

(1) 脱硫効果

Fig. 5 に母材のS%と溶解後のS%の関係を示すが、既に報告されているように母材S%の高いものほど脱硫効果が顕著である。特にステンレス鋼の場合CaOの多い脱硫スラグを使用できる点も脱硫に効果的である。Fig. 6 にはJ I S法によるA系介在物の面積率のヒストグラムを示すが、傾向として大きな介在物が減少していることがわかる。

Fig. 3. Mechanical properties of 12% Cr steel.

Fig. 4. Mechanical properties of 12% Cr steel at elevated temperature.

(2) 脱酸効果

ESRによる脱酸効果については種々データがある。一般的にはVAR法より脱酸効果が劣るといわれている。今回の調査の結果もVAR材に比し酸素レベルは高かったが、これは溶解法に左右されるところが

Fig. 5. Behaviour of sulfur after electroslag remelting.

Fig. 6. Frequency diagrams of sulfide contamination of 12% Cr steel.

多い。その後脱酸に留意して溶解を行えば50%前後の脱酸効果があることがわかった。Fig. 7 にその一例を示す。なお他の鋼種も含めて今までに得られたESR材の最低の酸素量は12ppmで、10ppm以下にするにはさらに若干の技術的問題が残っている。

3.2 高炭素高クロムステンレス鋼(SUS440C)

高炭素高クロムステンレス鋼の代表的なものとして耐食耐摩耗部品として広く使用されている440Cがあ

Fig. 7. Oxygen content in 12% Cr steel.

Table 4. Chemical compositions of 440C steel.

	(%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
Pole before ESR	0.98	0.44	0.57	0.029	0.017	0.08	0.24	16.90	0.39
Ingot after ESR	1.01	0.41	0.56	0.027	0.009	0.08	0.24	16.45	0.38

Pole : Ladle sample Ingot : Middle part

Table 5. Mechanical properties of 440C steel.

	Yield strength kg/mm ²	Tensile strength kg/mm ²	Elongation %	Reduction of area %	Hardness H _{RB}
Conventional	38.3	77.4	6.5	9.0	94.3
E S R	40.3	83.8	18.6	30.2	99.6

as full annealed

る。特に 440 C は熱間、冷間の加工性が劣り、従来から製造上のトラブルが絶えず、量産化し難い鋼の一つであった。Table 4 に供試材の E S R 前後の成分の一例を示す。前にも述べたように、E S R による脱硫効果が認められる。

3.2.1 熱間加工性

Fig. 8 は比較材 (I F 溶解材) と E S R 材の熱間ねじり試験の結果を示す。試験片はいずれも 25mmφ の鍛伸材から切出したものであるが、元来加工性の悪い材料であるため捻回値も低く、比較材との差もわずかであるが、実際の製造上はこの差が非常に大きく作用し、特に歩留りにおいては10%以上の差となって表われる。

3.2.2 機械的性質

Table 5 に焼きなまししたものの比較材と E S R 材の結果を示すが伸び、絞りが著しく改善されており、

Fig.8. Result in hot twist test of 440C steel.

×400

Conventional steel (8 mmφ)

×400

ESR steel (17mmφ)

Photo. 6. Microstructure of SUS 440C steel.

Photo. 7. Microstructure of slightly segregation SUS 440C steel.

Fig. 9. Effect of ingot size on distribution of maximum carbide.

線材を冷間加工するには、ESR材の方がいかに優位であるかがわかってほしい。

3.2.3 ミクロ組織

Photo. 6 にその一例を示す。共晶炭化物が残存する組織であるために鍛錬比（加工比）との関係があるが、ESR材の場合、鍛錬の少ないものでも良好な組織となる。特に低倍率での検鏡結果、炭化物の凝集組織；すなわち偏析の少ないことがわかる。Photo. 7 は鍛錬比6の場合の組織である。

3.2.4 鋼塊径と炭化物分布の関係

ESRの効果は炭化物；特に共晶組織を有する高炭素工具鋼、高速度工具鋼において微細化効果があり、工具寿命の改善に効果的⁸⁾であるといわれている。また、その効果は大型鋼塊ほど顕著であるとされている。

今回調査した 280kg から 1800kg までの鋼塊からかなり鍛錬比のきいた 13mmφ から 20mmφ までの最大

炭化物の頻度を Fig. 9 に示す。図から明らかなように鋼塊寸法の差が認められる。また分布の状態も異なることがわかる。従ってESRといえども炭化物の微細な組織を得るには径の小さい鋼塊で適正な溶解を行なう必要がある。

4. ま と め

ESR材の諸性質についての調査結果は従来報告されている効果と同一であり、VAR材と比較して何ら遜色がなく、経済性などの観点から見ればESRの方が優位であることが確認できた。さらに実用上の諸性質を調査中であるが、ESR材の特長をまとめると下記ようになる。

- (1) 非金属介在物；特にA系の少ない清浄鋼が得られる。
- (2) 偏析などの欠陥の少ない良好なマクロ組織が得られる。
- (3) 熱間加工性がすぐれている。
- (4) 伸び、絞りなど靱性が改善される。
- (5) 適当な鋼塊寸法を選べば良好な炭化物組織が得られる。

以上、今回はマルテンサイト系ステンレス鋼のESR材の諸性質について調査した結果をまとめたが、ESRそのものは未完成な技術であり、VAR法より溶解パラメータが多く⁹⁾鋼種および客先の要求品質によってはその条件選定が難しい。従って条件の選定を誤まれば欠陥の発生も見られる。今後さらにESRの技術的な研究と溶解法の安定が急務であろう。

(文 献)

- 1) A. Choudhury, R. Jauch; 3rd ESR Symposium, 1971-6
- 2) B. E. Paton et al.; Iron & Steel, 34 (1961) 3, 102~104
- 3) W. Holzgruber et al.; Stahl u. Eisen, 88 (1968) 12, 638~648
- 4) Yu. V. Latash, B. I. Medovar; Electroslag Melting, 1970
- 5) 加藤；電気製鋼, 41 (1970) 4, 302~313
- 6) M. Wahlster et al.; Stahl u. Eisen, 88 (1968) 23, 1193~1202
- 7) 大同製鋼；第46回特殊鋼部会資料
- 8) I. Petrman; 3rd ESR Symposium, 1971-6
- 9) H. J. Mueller-Aue; Proceedings of the Vacuum Metallurgy Conference 1971