

技術報告

UDC 669.187.26-982 : 669.14-154.9

ESR の最近の応用例とその製品について*

Review of Current Application of ESR and its Products

Manfred WAHLSTER**

Synopsis:

In the past 20 years, there were some developments of vacuum metallurgy and, at each time, every special metallurgical process was to meet the demand of customers for better quality and its improved mechanical property.

Studies have been made in this paper as to the most current development in this field, i.e., Electro-Slag Remelting process, as one of the special metallurgical processes following up the trend of vacuum metallurgy.

ESR process has spread rapidly all over the world recently but it is still under development and one can not state with an absolute certainty what reasons could lead to the large scale technical application of this process without exact knowledge of the individual application.

Several important technical and economical reasons for applying this process should be known in the steel industry so that one can understand its advantage without any arbitrary decision.

(Received April 3, 1973)

1. 序 論

特殊冶金プロセスを応用する理由にはいろいろあるが、その理由も時とともに変化する。20年にわたる真空技術の発展をふり返つてみると、当初の応用の理由は白点防止のための脱水素であり、ついで低酸素鋼をうるための真空脱酸(CO反応)であり、今日では溶鋼の均質化、成分補正の可能性ならびに合金、脱酸金属の正確で再現性のある添加投入技術に移つてきている。さらに新しい真空冶金の方向は、たとえばトランスまたはダイナモ・プレートやステンレス鋼のごとき極低炭素鋼を得ることができる真空脱炭プロセスである。

エレクトロ・スラグ再溶解(ESR)プロセスは急速に世界中に普及してきているが、なぜこのプロセスが大規模に应用されるのであろうか。個々の応用ごとに理由は多くあるが、そのおもなものを Fig. 2 に示した。

ESR プラントを設置すべきかどうかの決定にあつては、いくつかの理由を総合して検討されるのであろうが、技術的な品質の問題とならんでその経済性の問題も重要なファクターである。

2. 材料性状の変化

ESR プロセスの製品についての材質研究の文献は多

いが、精錬に関する研究は比較的少なく、またその研究は小型インゴットについてのものがほとんどである。これら小型インゴットについて得られた結果が大型インゴットにも適用できるかどうかは今後の研究にまたねばならない。

鋼を ESR することにより材料性状は変化する²⁾。おもな変化の状態を比較表として Fig. 3 に示した。図示の通りインゴット表面、インゴット密度およびインゴット歩留は通常の鑄造インゴットよりもずっと良い。Si, Al または Mn のごとき酸化しやすい元素はもし精錬中何も特別の手段が講じられず、また精錬すべき電極金属の成分にあらかじめ配慮がなされなければ減耗する。同じことが酸素や硫黄についてもいえるが、材料性状を改善するためには、逆に望ましいことといえる。しかしながら、ESR プロセスは、真空下ではないので揮発しやすいトレース成分あるいは水素を減少させることができない。それと共に空気中の湿分やスラグ構成成分から水素を吸収しようとする傾向がある。この理由のために、大型インゴットでは真空処理した鋼を電極として採用するのが普通である。おもな改善点はミクロ的にもマ

* 昭和48年4月3日受付

** Leybold-Heraeus GmbH Co. KG. Hanau, W. Germany Dr. Ing.

翻訳 鶴飼惣市

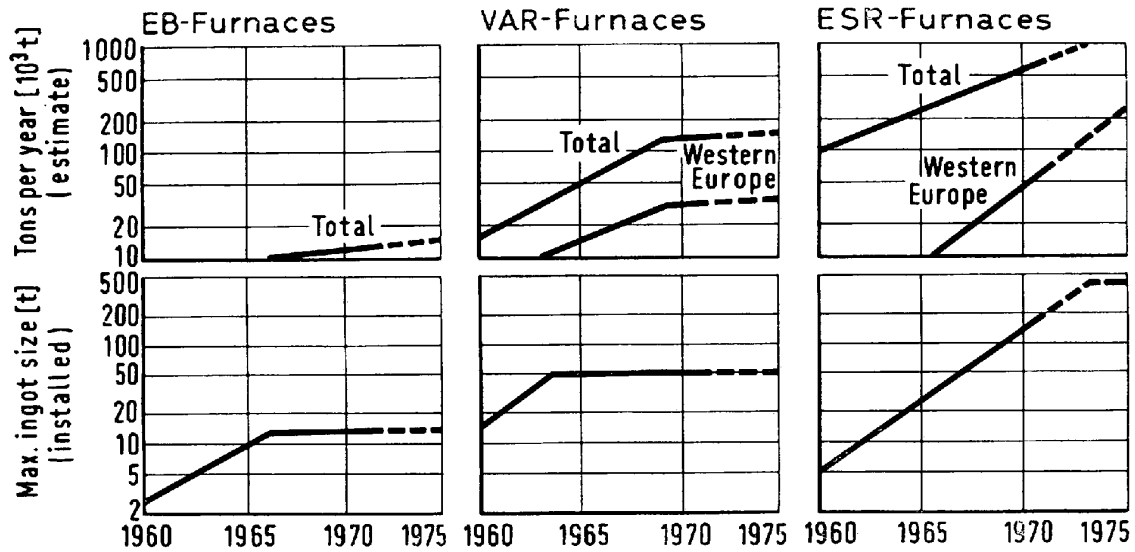


Fig. 1 Development of yearly output and maximum ingot size.

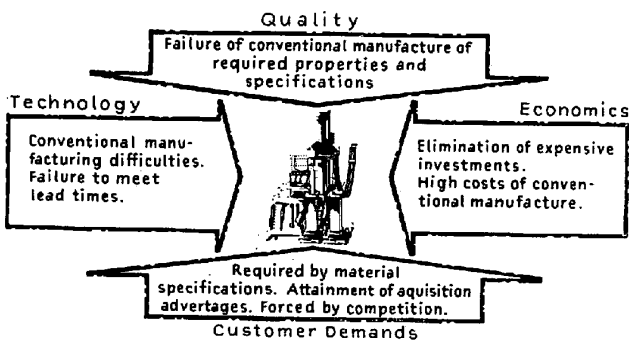


Fig. 2. Reasons for the application of ESR technology.

	Conventional	"After pouring"	ESR
V %	0.02	0.02	0.02
Si %	0.05	0.03	0.03
Mo %	0.06	0.06	0.04
P %	0.007	0.003	0.002
S %	0.009	0.002	0.003
Mn %	0.11	0.09	0.05
Cr %	0.17	0.10	0.05
Ni %	0.24	0.20	0.07
O ppm	100	70	70
C %	0.10	0.07	0.03

Fig. 4. Ingot segregation in heavy forging ingots (Ingot Weight > 70 t, Mean Values)

	worsened	unchanged	improved	more improved
Ingot condition surface porosity and density yield (output)			←→	←→
Chemical composition basic metals hydrogen oxygen sulphur tracers	←→	←→	←→	←→
Cleanliness microscopic macroscopic			←→	←→
Ingot structure ingot segregations crystal segregations	←→	←→	←→	←→
Mechanical properties tensile strength yield point impact value isotropy		←→	←→	←→

*) remelting defects, e.g. freckles

Fig. 3. Influence of electro slag remelting on properties (after M. Wahlster)

クロ的にも清浄度が上り、インゴット中のマクロ、セグレゲーションが減少することである。これらの改善のもたらすおもな効果は靱性の向上である。

通常溶解鋼と比較して ESR 溶解鋼が実際に改善されるのか、そしてどの程度まで改善がなされるかは Fig. 3 に示したが³⁾、これらの改善は、真空前処理、あるいは特殊な冶金的处理によって ESR 前にある程度の処理を行なったものも含んでいる。大型鍛造品においてはインゴット偏析のため、たとえば熱処理で非常にむずかしい問題を発生する。

Fig. 4 は ESR プロセス⁴⁾⁵⁾では、大きな凝固断面においてさえインゴットの偏析現象をほとんど完全に除去できることを示している。比較の基準として文献から抜粋した通常法により鑄造された大型鑄造用インゴットの偏析状態を示したが、明らかに ESR プロセスは偏析が少ない。

凝固初期の液体-固体域における物理的なプロセスの

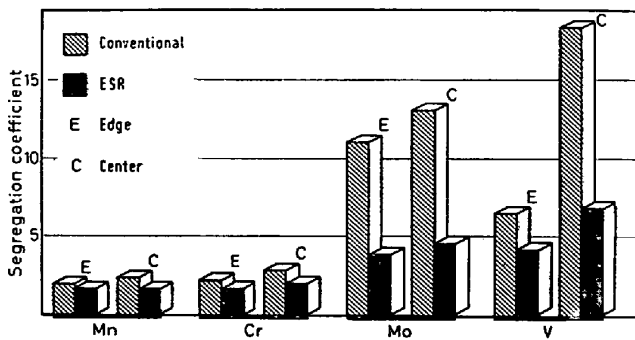


Fig. 5. Segregation pattern of a Hot-Work Tool-Steel X 40 Cr Mo V 5·1.

である。しかしその程度は、中心部のように品質の点で最も劣る部分でさえ通常鋼よりもはるかに少ないものである。

熱間加工用鋼 X 40 Cr—Mo 5·1 のインゴットから得られた典型的な結果⁶⁾ を Fig. 5 に示す。マイクロアナライザーによる偏析の度合は成分の最大・最小濃度の比で示した。ESR プロセスによつて達成された改善、とくに使用上の性状および機械的な品質の改善に関する詳細については以下に述べる。

3. ESR 法と通常法の比較検討

つぎに通常溶解鋼と ESR 溶解鋼の比較を Table 1 に示した。その代表例についておもな改善点を以下に述べる。

Table 1. ESR プロセスによる改善例

製品名	鋼種 (典型的な例)	不良の原因 通常生産での問題点	ESR プロセスによる改善	文献および図番
ローラー	80CrMo7	非金属介在物 表面ピーリング量が多い	誘導焼入れにおいて十分焼が入り、硬度が出る 長寿命	7) 8) Fig. 6 Fig. 7
ボールベアリング鋼 ローラベアリング鋼	100Cr6 100CrMo85	表面清浄度不足 圧壊強度不足	カーバイド偏析の改善 硬化過程でクラックが発生しにくい	6)
ローター タービンおよび ゼネレーター シャフト	26NiCrMoV14·5 30NiCrMoV5·11 X20CrMoV12·1	非金属介在物 ポーラスな中心部 境界面に粒状デポジット	中間ストックが不要 アセット不要 靱性遷移温度の向上	8) 14) Fig. 8 Fig. 10 Fig. 11
タービン・ ディスク	34CrNiMo6	非金属介在物 変形性大 起り易い中心部偏析	不良がかなり減少 機械的性質を表わす数値がさらに均等化 靱性が更に大になる	8) 14) Fig. 9
ダイス	50CrMo4 55NiCrMoV6 56NiCrMoV7	研磨性および加工性の悪さ	非成形品使用の可能性 硬度、靱性がきわめて大	8) Fig. 12
熱間加工鋼	X40CrMoV5·1	横方向靱性不足 大きな変形	同じ靱性で熱加工強度が高い	6) Fig. 14
高速度鋼	S6-5-2	はっきりした縞状組織 不十分な均等性 熱間成形性の悪さ	高炭素での鍛造性 カーバイドの分散がさらに均一	6) Fig. 15
不銹鋼	X2CrNi189	研磨性、表面品質が不十分 清浄度が悪い	耐腐蝕性の増大 窒化物の減少 靱性の増大	11)
高温用鋼	X17CrMoV Nb12·1	清浄度不十分 デルタフェライト値の分散大	クリープ強度改善 正確な成分値 高い組織上の安定性	11) Fig. 16
耐熱鋼	X38CrMoV5·1 X41CrMoV5·1	非金属介在物 縦横方向での靱性アンバランス	小さい変形 ノッチ・インパクト強度の増大	13) 14)
厚板	St 52/3 20NiCrMo36	非金属介在物 中心部偏析 溶接性	靱性の増大 異方性少なく、分散値が均等	3) Fig. 17

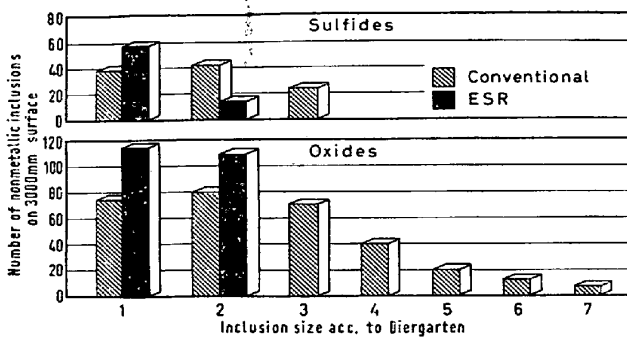


Fig. 6. Number and size of nonmetallic inclusions in cold rolls of steel grade 85 Cr Mo V 7.

3.1 コールドロール

鋼および非鉄金属ストリップとフォイルの冷間圧延において決定的な要素は、材料組織の均一性と清浄度にある⁷⁾。一方、ローラー表面の非金属介在物は加工すべき素材を傷め、品質の低下を招き不良の原因ともなる。200~300 mm 径の ESR ロールの大規模な使用テストで集められた経験は、今までのところすばらしいものである。清浄度を改良することにより (Fig. 6), 表面仕上げにほんの少しの研磨を必要とするだけであり、ロールの寿命は 50% 以上増加する。大きな非金属介在物がないということはロールが深く硬化されているときでさえ、ピーリングが不要であることを示す。非常に高負荷をかけられたタンデムミルにおいて発生する独特の難しい問題として、いわゆる「はん点」を形成することがあるが、これは適当な精練パラメータを選択することによって完全にさけることができる。

3.2 艶出しロール

高品質の艶出しロールに対するおもな要求⁷⁾、すなわち高い清浄度および実操業における真円度は非常に厳密なものになっている。通常法により経済採算基準にのつてこの種のロールを製造することは現在ほとんど不可能である。

Rheinstahl Hüttenwerk 社 (西独ハッチング市) では近年、客先の表面仕上げに関する要求が極端である場合も、まったく不良を出すことなく数百本の艶出しロールを生産している。ESR インゴットは水平および垂直方向の偏析が少ないため、機械加工性と熱処理性においても苛酷な条件に耐える。

200°C に内部を加熱された艶出しロールのホットランでの挙動 (真円度) に対する評価 (Fig. 7) は、すべての ESR ロールが 10 μ の最大許容偏差に適合しているのに対し、通常法により製造された艶出しロールはその 70% しかこの要求に合致していない。

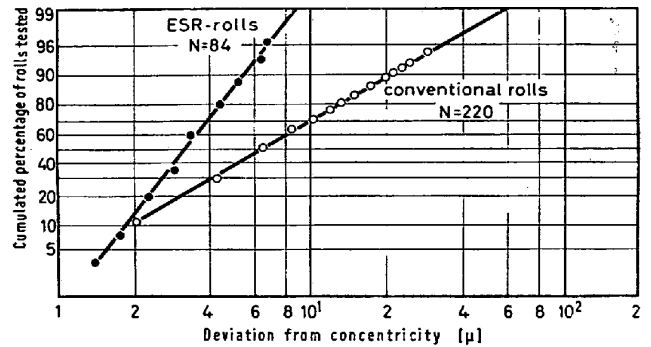


Fig. 7. Influence of ESR melting on the high temperature running characteristics of calender rolls.

3.3 ローター

3.3.1 インダクター・シャフト

高応力のかかるタービンおよびゼネレーター・シャフトの製造に際しては再溶解鋼の使用は、とくに興味あるものである。現在普及している特殊鋳造法を含む種々の特殊冶金プロセスは介在物の分布⁸⁾とか、インゴット・セグレゲーションの抑制という面で部分的に成功しているにすぎない。なぜならばそれらの方法は凝固過程、とりわけ大きな凝固断面を持った凝固過程に影響を与えることができないからである。端部および中心部で採取したサンプルにより機械性状⁹⁾を比較してみると、ローターに適用する場合の基本的な認識が得られる。(Fig. 8)

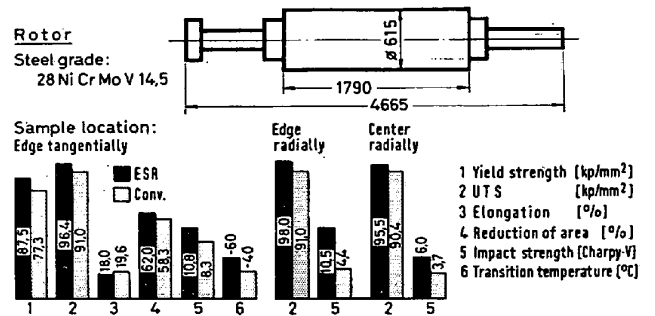


Fig. 8. Comparison of mechanical properties of rotors.

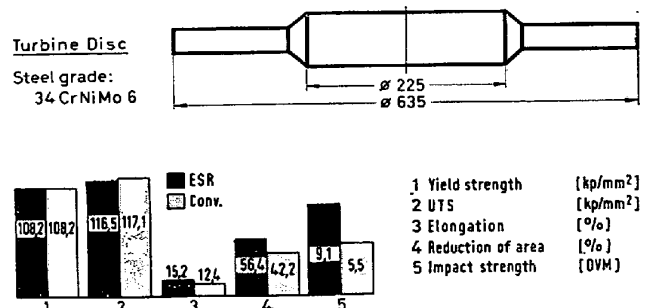


Fig. 9. Comparison of mechanical properties of turbine discs.

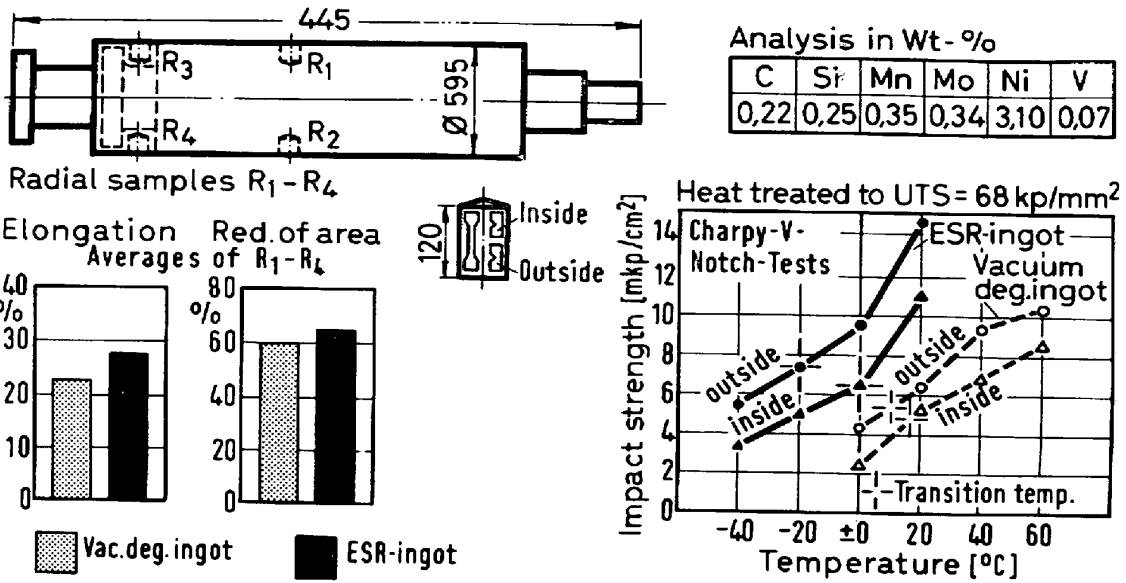


Fig. 10. Comparison of mechanical properties of 8,9 t-generator rotors produced from vac. deg. and ESR melted ingots respectively.

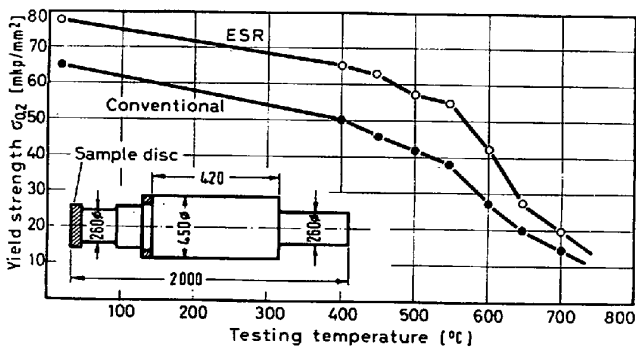


Fig. 11. Elevated temperature yield strength of a gas turbine rotor (steel grade X Cr Mo V 12.1).

凝固過程は比較されるローターが相応の熱処理をされているときには強度と降伏点には実際上何も影響を与えない。一方通常法で製造された鋼の切欠き衝撃強度は中心部に向つて非常に低下している。中心部の衝撃強度は表面に比べて50%以下である。ESR鋼の切欠き衝撃強度値もまたインゴット中心に向つて低下するが、比較的低い割合であるか、より高い絶対値で始まるかという違いがある。

3.3.2 その他

その他タービンディスク、ゼネレーターローター、ガスタービンローターなどについては Fig. 9, 10, 11 に

Steel grade:

55 Ni Cr Mo 64

σ_s	σ_B	δ	ψ
kp/mm ²		%	
149,0	160,7	10,8	41,9
157,0	166,8	10,9	38,9

Starting stock
After ESR

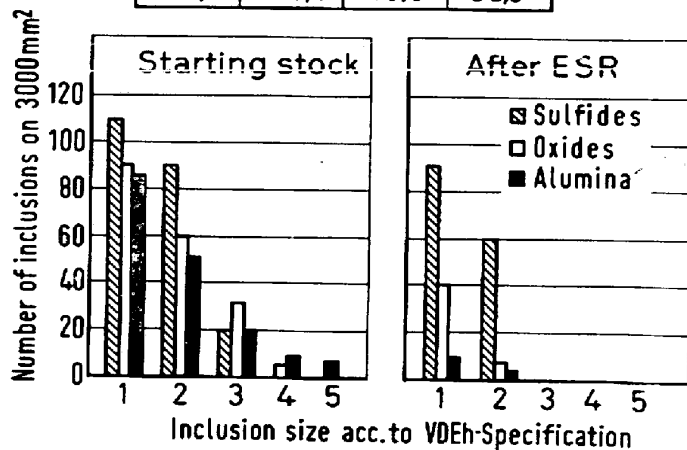
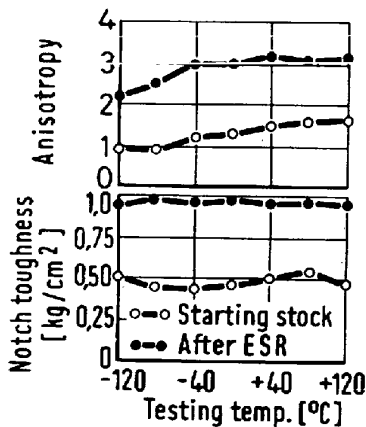


Fig. 12. Property improvement by ESR melting of a die steel (steel grade 55 Ni Cr Mo 6.4).

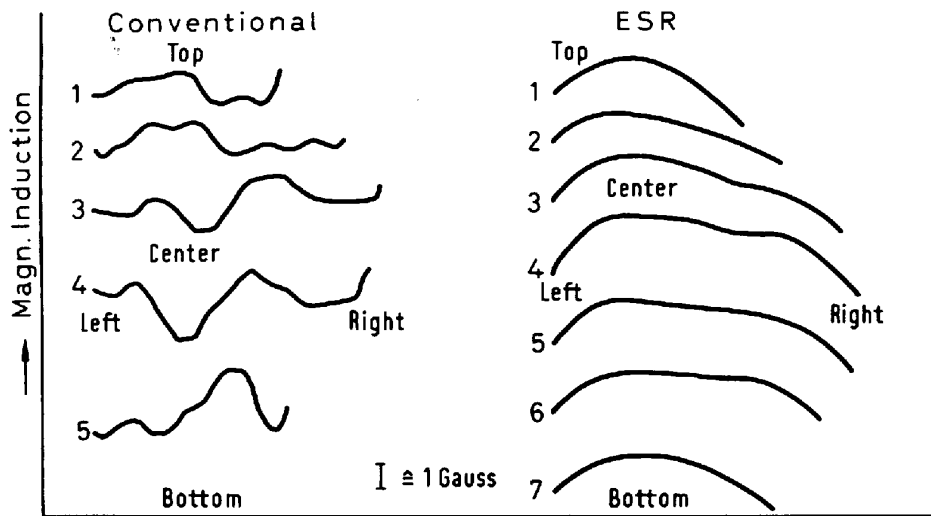


Fig. 13. Field strength in test of a pole shoe plate.

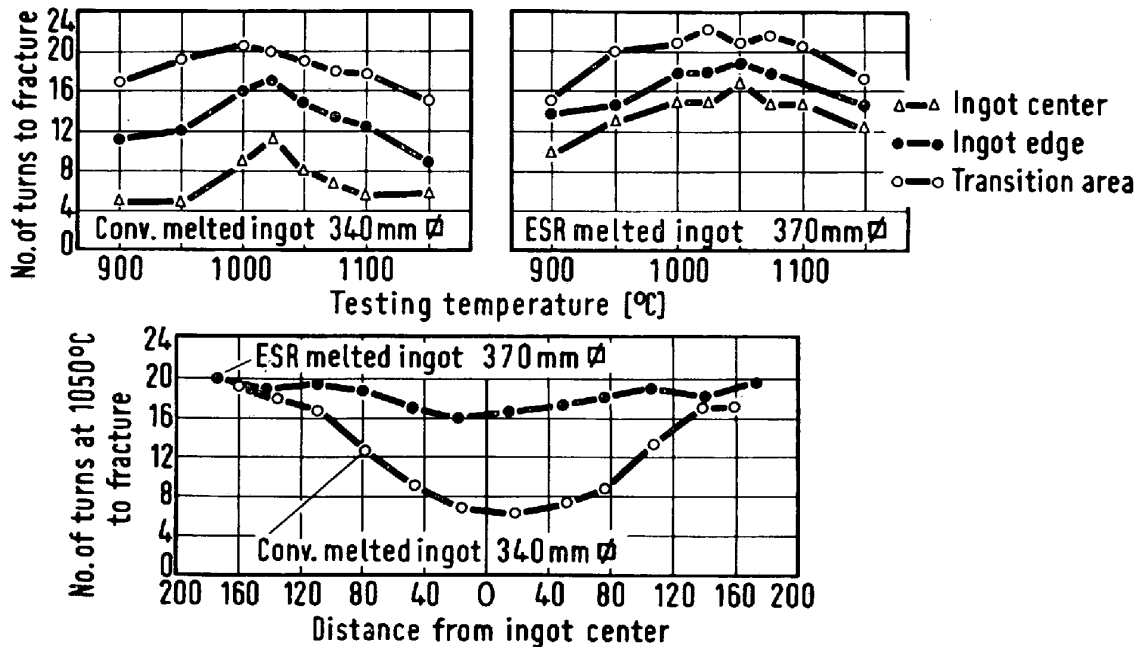


Fig. 14. Hot forming properties of as cast hot work tool steel X 40 Cr Mo V 5.1 as determined by torsion tests.

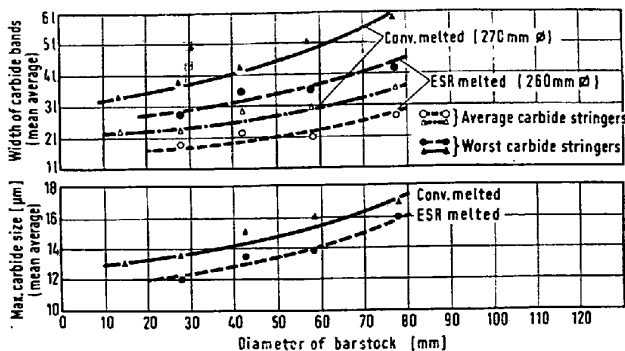


Fig. 15. Carbide banding and carbide size of as rolled high speed steel S 6-5-2 (acc. to Stahl-Eisen-Prüfblatt 1615-59)

見られる通り、ESR 溶解鋼の場合にはそれぞれ特色がある。

3.4 ダイス

ダイス鋼を ESR プロセスで製造した場合の性状の改善例を Fig. 12 に示す。

3.5 ソフトマグネット

大型加速器に使用されるポールシュー・プレートの磁力は ESR 溶解鋼の場合、各点で均等であることがわかる (Fig. 13)。

3.6 工具鋼および軸受鋼

Fig. 14 および Fig. 15 に変形性能、カーバイドサイズについて示す。

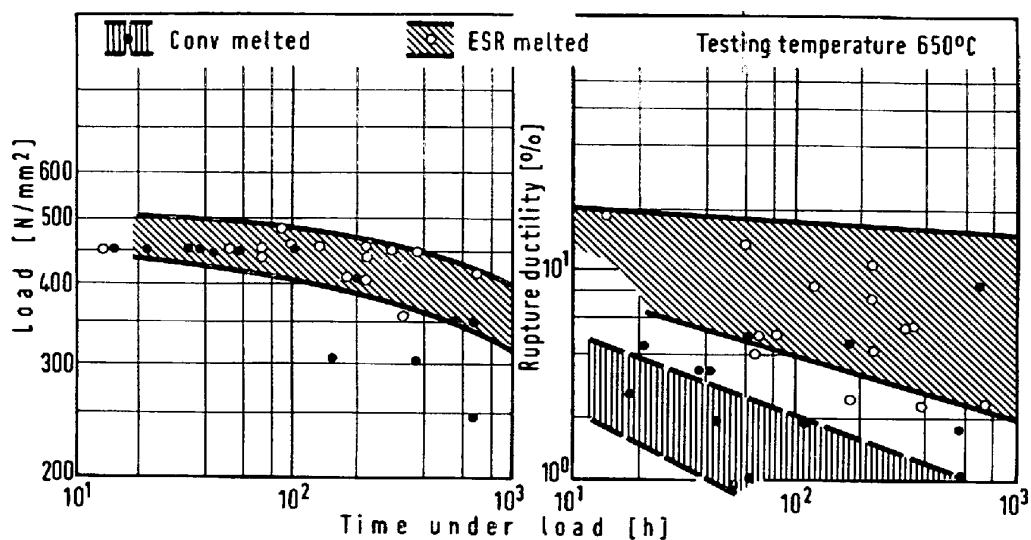


Fig. 16. Creep rupture properties of steel grade X 5 Ni Cr T 26·15.

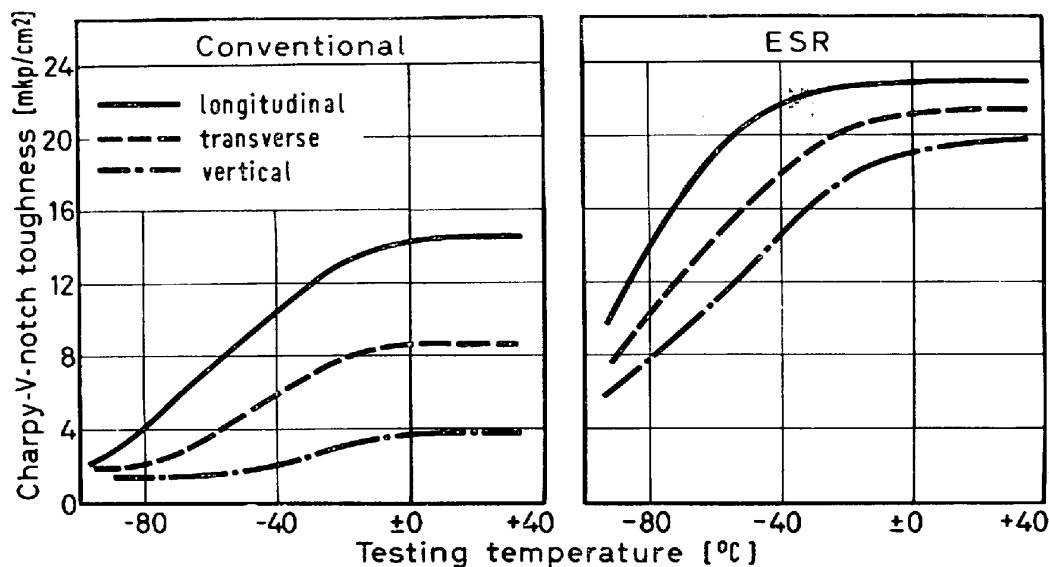


Fig. 17. Influence of ESR melting on the ductility of a fine grained structural steel (25 mm plate thickness).

3-7 高温用オーステナイト鋼

Fig. 16 にクリープ強度についてのテスト結果を示す。

3-8 鋼板

通常溶解の場合には避けることができない縦横方向で靱性が異なること、中心部は偏析が多くなり溶接性が悪化すること等々に対し、性状を均等化しようとする要求は ESR プロセスの採用によって改善しうる。切欠き衝撃強度の改善について Fig. 17 にその一例を示す。

4. 経 済 性

以上のように見てみると、鉄鋼界においてもつと ESR プロセスは応用されてもよいと考える。しかしながら、ESR プロセスは品質改善の面ではかなり研究されてい

るが、経済的にも利益があることがまだ十分認識されていないのではないだろうか。最近では電算機を利用して ESR プロセスへの完全切換えまたは部分切換えの場合のメリットを計算できるようになってきた。ESR インゴットに要する精錬コストが材料面、加工面の利益、あるいは不良率の低減による利益を勘案することによって、補償されるかどうかはローカル・コンディションや製品によって決まるものである。通常の生産法と比較して全コストを正確に決めるために上記のように区分けした算定法を用いる。Table 2 は典型的な鍛造品を選び計算したものである。DM 250, DM 350, DM 450/t の異なる再溶解コストのものについて全製造費を右側三例に示した。(通常法を 100% として) この仮定のもとに、

Table 2. Calculations of typical forging pieces for comparison purposes (rejection rate AT of ESR steel=50% of conventional).

Forged product	Material	Finished forging piece in condition to be shipped		Relative manufacturing costs ESR vs. conventional in % (conv.=100%)						
		Weight	Value appr. DM/t	According to manufacturing stages at 450DM/t remelting costs				Total at remelting costs of (DM/t)		
				Material	Forging	Machining	Rejection	250	350	450
Bar 400 φ	X20Cr13	1-5	1 650	162	98	100	66	112	119	126
Ring	100Cr6	6.7	3 750	177	99	100	57	108	113	118
Ring	X5CrNi18-9	20.2	10 450	106	96	100	65	90	93	96
Cold roll	80Cr7	4.6	5 400	163	46	100	68	97	100	103
Calender roller	65Cr6	7.7	7 500	172	48	98	50	98	100	102
Rotor	X20CrMoV12-1	1	7 150	142	84	96	57	98	101	104
Rotor	25NiCrMo14-5	8	5 700	140	71	100	57	97	101	105
Rotor	28NiCrMo7-4	11	7 050	120	30	100	41	84	90	96
Rotor	25NiCrMo14-5	15	5 400	136	69	100	57	96	100	104
Rotor	28NiCrMo7-4	44	5 950	119	60	100	53	87	91	95
Rotor	28NiCrMo7-4	68	5 400	136	57	100	55	90	94	99
Rotor	28NiCrMo7-4	117	6 600	125	81	100	54	89	93	97

通常法により鍛造品と比較して ESR インゴットのコストは概略等しくなりうる。(このことは重量 12t までのインゴットによる Rheinstahl Hüttenwerke 社の数年にわたる生産経験によつて確認されている)これはまた厚板製造分野に対しても、最近の米国のレポート³⁾によつても立証されている。

5. 要 約

過去 10 年の間に ESR プロセスは大規模な技術プロセスの中に位置を占めてきており、ある場合には真空アーク再溶解炉に取つてかわつてきている。Table 1 再溶解製品または鋼材によつて得られた経験を要約したものである。ESR プロセスは高水準の知識や経験があるので鉄鋼界において一層積極的に応用を計り、このプロセスの基盤の確立を進めるべきだと考えるが、それには ESR プロセスの経済性についての十分な認識が必要であらう。

文 献

- 1) M. WAHLSTER, H. SPITZER: Stahl u. Eisen, **92** (1972), p. 961-972
- 2) M. WAHLSTER: Neue Hütte, **16** (1971), p. 611-614
- 3) M. WAHLSTER: Rheinstahl Technik, **9** (1971),

p. 83-90

- 4) H. LOEWENKAMP, A. CHOUDHURY, R. JAUCH, and F. REGNITTER: Stahl u. Eisen, (近日中に発表)
- 5) H. LOEWENKAMP: 6th International Forgemaster Meeting, (1972年10月1日-6日, Cherry Hill, N. J. USA)
- 6) A. RANDAK, S. STAUZ, W. VERDERBER; Stahl u. Eisen, **92** (1972), p. 981-993
- 7) H. J. KLINGELHOEFER, A. CHOUDHURY, and E. KOENIGER: Rheinstahl Technik, **1** (1971), p. 20/24, Rev, Metall, **6** (1970), p. 515-522
- 8) E. ZIMMERMANN, E. KOENIGER, W. POETTERING: Radex-Rundschau, **5** (1971), p. 563-576
- 9) M. KRONEIS, E. KRAINER, H. HOJAS, and Th. KAMLETZ: 5th, International Forgemasters Meeting, (1970年5月6日-9日, Terni/Italy)
- 10) W. SCHWERMANN: 未公表研究論文, Rheinstahl Hüttenwerke AG. Hattingen
- 11) H. SPITZER: Stahl u. Eisen, **92** (1972) p. 994-1002
- 12) M. WAHLSTER, E. ZIMMERMANN: 6th, International Forgemasters Meeting (1972年10月1日-6日, Cherry Hill, N. J. USA.)
- 13) R. IRVING: Iron Age, **12** (1972), p. 50-52
- 14) E. PLOECKINGER: STAHL u. Eisen, **92** (1972), p. 972-981