

真空鑄造の鋼質におよぼす影響*

(真空鑄造鋼と普通鋼との比較—II)

鈴木登能弥**・朝熊 利彦**

Influence of Vacuum Casting on Quality of Steel.

(Comparison of vacuum-and air-cast steels—II)

Tonoya Suzuki and Toshihiko Asakuma

Synopsis:

The vacuum casting is no cure-all, but has a number of advantages. Following a through twenty months experience, the following benefits were recognized.

(1) 60 % of hydrogen in steel and 30% of oxygen were removed, but nitrogen content would not vary appreciably.

(2) The vacuum pouring gave higher properties in directions transverse to the direction of work. It was noted that there was little or no change in tensile and yield strength, an improvement was indicated in elongation and reduction of area on the vacuum steel. Generally properties of the vacuum steel had less variances than those of air ingots.

(3) Ultrasonic test had proved no internal defects.

(4) Microscopic study and sand analysis indicated the reduction of non-metallic inclusions by 30%. But porous or spongy surface by the spraying resulted in increase of sand marks in surface.

(5) The segregation was not materially affected.

The dendritic structure had less growth by the vacuum casting; and a ghost with microcracks was dissolved.

(6) The vacuum pouring had resulted in elimination of the secondary cavity with a greater certainty.

(7) The vacuum steel had indicated a freedom from flakes.

(8) The heat treatment cycles would be reduced from a half to one third.

I. 結 言

1950年ドイツの Bochumer Verein A. G. は大量の溶鋼を真空処理するいわゆる真空鑄造を工業化し脚光を浴びるようになり、すでに欧米諸国においては広く採用されているが、わが国においても漸く本年より活況を呈するものと思われる。操作を開始してより 20 ヶ月を経過しその間 Ni-Cr-Mo, Ni-Cr, Cr-Mo-V, Cr-Mo, Cr, W, C 鋼について 3~16 t 鋼塊に適用し優れた効果をあげている。

II. 真空鑄造の鋼質におよぼす影響

(1) 機械的性質

Ni-Cr-Mo 鋼について鋼種、溶解、大きさを同じくする鋼塊からの鍛造片から縦方向ならびに横方向に機械的試験値を求めた。ただし試験片採取の際水素放出に關して特別の注意は払われていない。Fig. 1 は鑄造条件別、

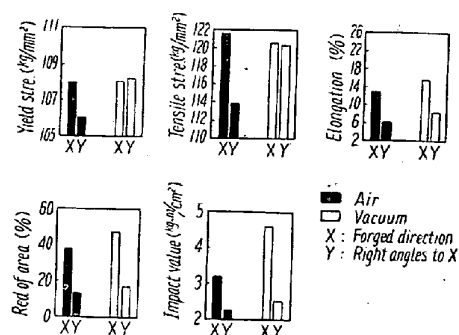


Fig. 1. Mechanical properties of air- and vacuum-poured Ni-Cr-Mo steel.

方向別の機械的性質を示し真空処理は加工方向に直角の性質を改善することが認められる。

Table 1 は上述の鋼塊においてそれとは別個の鍛造および熱処理工程を経たものの性質を示す。両者を比較し

* 昭和33年10月、34年4月本会講演大会にて発表

** 関東特殊製鋼株式会社

Table 1. Mechanical properties of Ni-Cr-Mo steel forgings from air and vacuum-poured ingots.

Heat No.		Yield strength kg/mm ²	Tensile strength kg/mm ²	Elongation %	Reduction of area %	Impact value kg-m/cm ²
7915	A	146.2	150.9	8.0	15.1	2.7
	V	146.2	150.2	9.4	22.8	2.3
7982	A	143.2	146.2	10.9	30.2	3.4
	V	142.3	146.9	11.8	28.9	3.1
70041	A	146.2	157.3	8.2	20.3	2.7
	V	138.4	146.2	12.0	30.2	2.8

Table 2. Mechanical properties on Cr-steel forgings from conventionally and vacuum cast ingots (24 tests).

As quenched and tempered.

Properties	Air			Vacuum		
	Min	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
Yield strength kg/mm ²	88.7	104.9	96.0	91.9	98.1	94.7
Tensile strength kg/mm ²	96.5	113.7	108.2	103.3	111.4	108.4
Elongation %	4.9	9.8	6.8	7.0	8.6	7.8
Reduction of area	10.2	12.5	11.5	10.5	11.6	11.1

As annealed

Properties	Air			Vacuum		
	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
Yield strength kg/mm ²	28.3	40.3	31.9	30.8	34.4	32.9
Tensile strength kg/mm ²	61.1	86.4	67.6	62.1	64.6	62.9
Elongation %	6.0	16.5	12.9	14.7	16.4	15.8
Reduction of area, %	7.5	13.0	10.3	8.5	9.8	9.0

て 鑄造条件よりも加工条件の影響の方が強く現われている。Cr 鋼についても同様の試験を行い鑄造条件別に平均値および最低、最高値を Table 2 に示した。平均値は両者共ほぼ同じであるが真空鑄造鋼においては最低、最高値の差が小さい。

真空鑄造によつて均一なる機械的性質が得られるもう一つの例として Table 3 は鋼塊各部の比較を示す。普通鋼鋼塊の方が最低、最高値の差が大きく伸び、絞りが劣るようである。

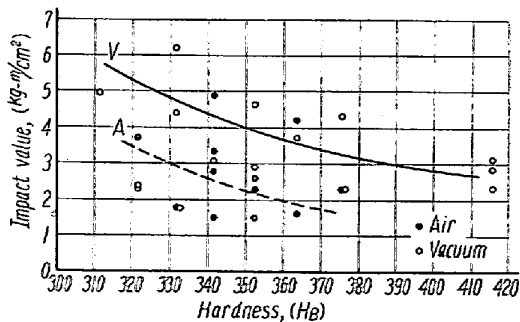


Fig. 2. Impact properties of air-and vacuum-cast steels(Ni-Cr-Mo steel).

Fig. 2, 3 に Ni-Cr-Mo 鋼および Cr 鋼の耐衝撃性を示した。真空鑄造によつて若干改善されることがわかる。

これらから見て真空中両試料間の有意差は鍛造、熱処理変化によるものの方が大きく機械的性質に影響をおよぼすのは本質的に加工工程であり真空鑄造によつていちじるしく

向上せしめることはできない。しかし加工方向に直角の性質はよくなりまた伸び、絞り、耐衝撃性に若干の向上が見られ普通鋼に比較して均一化された結果が得られるといえよう。

(2) 超音波試験

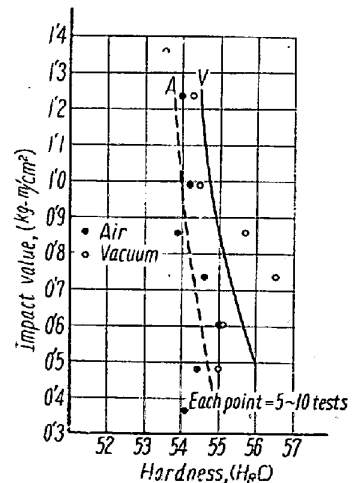


Fig. 3. Impact properties of air-and vacuum-cast steels (Cr-steel).

Table 3. Comparison of mechanical properties in a Cr-steel ingot, air-vs. vacuum-cast (7800-kg ingot)

Properties			Top	Midway	Bottom
Yield strength kg/mm ²	A	Min. Max. Avg.	93.2 104.2 97.3	88.7 98.1 94.9	88.7 104.9 97.3
	V	Min. Max. Avg.	91.9 98.1 95.1	91.0 97.5 94.3	92.2 96.5 94.4
Tensile strength kg/mm ²	A	Min. Max. Avg.	104.6 113.7 108.8	96.5 112.0 106.7	96.8 116.9 108.2
	V	Min. Max. Avg.	103.3 111.4 108.9	104.0 111.4 107.7	106.9 109.1 108.0
Elongation %	A	Min. Max. Avg.	9.8 15.8 13.6	10.0 14.0 11.9	12.6 19.6 14.8
	V	Min. Max. Avg.	15.0 16.2 15.6	14.8 17.2 16.0	14.0 16.0 15.0
Reduction of area %	A	Min. Max. Avg.	20.3 38.3 30.5	20.3 43.7 28.6	26.5 46.9 36.1
	V	Min. Max. Avg.	34.9 38.3 37.2	37.1 43.7 40.4	31.3 38.3 34.8
Impact value kg-m/cm ²	A	Min. Max. Avg.	3.3 6.7 4.6	3.7 4.9 4.2	2.7 6.7 4.2
	V	Min. Max. Avg.	3.7 5.2 4.5	3.3 5.0 4.1	3.7 4.9 4.4

Table 4. Ultrasonic tests of vacuum-and air-cast steel (Ni-Cr-Mo steel).

Grade	Vacuum-cast	Air-cast	
		Jan., 1957 to Jan., 1958	May, 1957 to Sept., 1957
A	100%	83%	70%
B	0	2%	6%
C	0	15%	24%

製造工程における欠陥の早期発見と製品の検査に超音波試験が行われている。Ni-Cr-Mo 鋼について同一溶解よりそれぞれ大気および真空鑄造を行い2本の鋼塊(5500 kg)からの鍛造品について超音波試験した結果が Table 4 である。透過性、欠陥反射などから3等級に分けAは同試験から見て品質を保証し得るもの、Cは不良

もしくは工程進行を保留すべきものに属する。5~9月(1957年)の比較的湿度の高い時期に溶解したものに不良率24%を計上している。そのいずれもが水素による欠陥と判定された。真空処理によつて水素による欠陥はほぼ完全に除去し得ることが判明したので1958年2月以降Ni-Cr-Mo 鋼は原則としてすべて真空処理を行うことになった。超音波試験結果はガス分析とともに統計的に集計され他の鋼種についても同様の結果を得ている。以上のごとく鑄込条件による相違が明らかであり真空鑄造鋼はなんらの異議をさしはさむべき欠陥を残さず超音波試験に関してはほぼ絶対的である。

(3) 収縮孔

鋼中ガスの減少によつてマイクロ収縮孔の出現が緩和されるのは当然であろう。押湯部の凝固面はV状をなすものは望ましくないがとかく現出し勝ちである。真空鑄造では凹形となりしかも収縮引けが浅くなる。Table 5は収縮状態の比較を示し鋼塊が大きくなるにつれてその差

Table 5. Depth of primary shrinkage pipes(mm)

Ingots (kg)	Air-cast	Vacuum-cast	Ingot (kg)	Air-cast	Vacuum-cast
3000	250	250	6500	315	310
4500	250	245	7800	310	290
5500	280	270	10000	250	235
6000	305	295	12000	260	235

が大きく押湯5%以上は節約できる。また鋼塊が大きくなるにつれて中心部の多孔性が顕著になる。ロール材製造において中心孔穿孔の際検鏡によつて存在の有無が認められあるいは超音波試験によつて確められる。4t以上の鋼塊には数%の発生率があつた。真空鑄造鋼には出現せず二次パイプを減少させ正常凝固と押湯効果を確実にするということができる。

(4) 非金属介在物

Cr 鋼について非金属介在物を顕微鏡およびサンドの分析により測定した。Table 6は清浄度(旧学振法)の比較である。ただしこの場合B系を伴うA系介在物はすべてA系に算定されている。小さな test ingot では大差ないが実際の鋼塊ではA系介在物が約20%減少している。Table 7は押湯部分より採取した試料について行つたサンドの分析結果を示し真空鑄造鋼は平均30%減少している。

つぎに地疵の現出状況を調査した。Table 8は同一溶解の真空鑄造鋼および普通鋼を125mmφに鍛伸後110mmφ, 80mmφ, 60mmφに3段切削して地疵試験を行い検査面積100cm²における地疵に換算して示し

Table 6. Microscopic inclusions.

Ingot		A type		B type		
		Cleanliness	Mean thickness(μ)	Cleanliness	Mean thickness(μ)	
Test ingot	A	1.39	2.36	1.56	4.01	
	V	1.26	2.16	1.53	3.94	
4.5 t ~ 7.8 t	Top	A	2.05	3.30	1.65	4.35
		V	1.64	3.10	1.60	4.17
	Bottom	A	2.14	3.00	1.60	4.03
		V	1.91	2.93	1.55	4.00

Table 7. Comparison of sand from air and vacuum-cast steel (Cr-steel)

Heat No.	Pouring	Total sand %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	FeO %	MnO %	Cr ₂ O ₃ %
8273	A	0.01064	0.00195	0.00417	0.00250	0.00072	0.00130
	V	0.00909	0.00182	0.00333	0.00212	0.00079	0.00103
8276	A	0.01571	0.00204	0.00659	0.00492	0.00084	0.00132
	V	0.01137	0.00180	0.00474	0.00315	0.00060	0.00108
8286	A	0.01799	0.00320	0.00651	0.00380	0.00192	0.00256
	V	0.00891	0.00167	0.00304	0.00290	0.00065	0.00065
8294	A	0.02300	0.00383	0.00703	0.00594	0.00398	0.00222
	V	0.01929	0.00345	0.00621	0.00495	0.00310	0.00158

Table 8. The number of the sand marks to converted into standard area (100cm²) of Cr-Mo steel rods in the case of gradation cutting.

Symbol	D _I (110 mm ϕ)		D _{II} (80 mm ϕ)		D _{III} (60 mm)	
	Number	Total length mm	Number	Total length mm	Number	Total length mm
8818 V	7.20	12.30	1.20	0.90	2.40	2.00
8818 A ₁	2.22	4.45	3.64	3.64	2.44	2.80
8818 A ₂	2.90	3.53	5.96	6.55	7.85	9.02

Table 9. The number of the sand marks in inspected area (110 mm ϕ \times 1000 mm) after cutting from a 125 mm ϕ bar of Cr-Mo steel.

Length of the sand mm	V ₂₈	V ₂₉	A ₃₀	A ₃₁	A ₃₂	A ₃₃
0.1 ~ 0.5	* 71~35.5	18~9	20~10	71~30.5	49~24.5	31~15.5
0.51 ~ 1.0	67~67.0	42~42	40~40	78~78	66~66	65~65
1.01 ~ 1.5	10~20.0	4~8	8~16	11~22	6~12	1~2
1.51 ~ 2.0	5~10	3~6	4~8	2~4	4~8	3~6
2.01 ~ 3.0	2~6	2~6			1~3	
3.01 ~ 4.0	3~12					
4.01 ~ 5.0	1~5	2~10				
Total sum	159~155.5	71~81	72~74	162~134.5	126~113.5	100~88.5

* The first figure is the number of the sand marks, the second is the sum of each length.

V₂₈~V₂₉: vacuum, A₃₀~A₃₃: air.

た. 110 mm ϕ ではむしろ前者に多数の地疵を認めたと 80 mm ϕ , 60 mm ϕ においてはいちじるしく減少するのに反し普通鋼では次第に増加している. 真空鑄造では溶鋼が微細な鋼流となるため鋼塊の表面層がスポンジ状を形成することに基因すると考えられる. Table 9 は 125

mm ϕ Cr-Mo 鋼鋼材を (110 mm ϕ \times 1000 mm) に機械切削後地疵を实体検査した結果である. 同一溶解であるが真空鑄造鋼必ずしも良好ではない. 検査面が介在物の多い外周部に相当したためと思われる. Table 10 は Cr 鋼の地疵検査結果を示す. 真空鑄造鋼, 普通鋼ともに良

Table 10. Sand marks of the rod from air-and vacuum-casting ingots (Cr-steel).

Heat No.	Number of sand marks in the inspected area (419 mm φ × 293 mm)						[O] ppm	Total sum	
	<0.1 mm	0.10~0.20 mm	<0.21~0.30 mm	0.31~0.40 mm	0.41~0.50 mm	>0.51 mm		Number	Length
8408	55	0	4	11	3	1	58	74	12.2
8579	57	2	5	8	0	1	—	73	10.4
8314*	15	1	8	2	1	1	20	28	6.0
8612*	7	0	4	1	3	1	31	16	5.5

* vacuum casting.

Table 11. Sand marks of the rod from vacuum-casting and vacuum-induction melting.

Symbol	Number of sand marks in the inspected area (165 mm φ × 455 mm)					[O] ppm
	<0.08 mm	0.10~0.20 mm	0.21~0.30 mm	0.31~0.40 mm	>0.5 mm	
1	—	—	0	0	2	30
2	—	—	1	0	3	
3	—	2	1	0	0	
4	—	—	1	0	1	
5	—	—	0	1	1	
6	—	1	1	0	0	
7	3	1	0	0	0	7~10
8	20	5	0	0	0	

7~8: Vacuum-induction melting.

好である。ことに前者は汚い表面層が削除され地疵は後者の1/2以下になっている。

Table 11 は真空鑄造鋼と真空溶解材の地疵比較を示す。きわめて厳格な仕様であつたため普通鋼では適合し難く真空鑄造鋼と真空溶解材をあてた。後者には0.21 mm以上の地疵は認められなかつたが小さい地疵は相当数存在した。0.20 mm以下の地疵は欠陥の対象としなかつたので前者に測定値が除外されている。なお以上の地疵中にはほとんど非金属介在物を伴っている。真空鑄造鋼では非金属介在物の分布範囲が狭く表面層近くに

集中しこの部分は普通鋼よりも劣るようである。普通鋼ではきわめて広い範囲に分布し総体的に見て真空鑄造鋼は普通鋼よりも清浄である。

(5) 偏析・組織

水素偏析に関して真空鑄造鋼は水素量の絶対値が低いことの外に濃度勾配の緩やかなことが報告され¹⁾²⁾一方水素は他の成分たとえばPの偏析を左右することが知られている。F. Harders³⁾, J. N. Hornak⁴⁾, K. C. Taylor⁵⁾などは

真空鑄造による偏析の減少を挙げこれに反して本質的に変化しないとの意見もある⁶⁾。Cr鋼について真空鑄造鋼および普通鋼の断面の各元素含有量の変化を調べた。Fig. 4は1 t鋼塊の変化を示す。両者間に元素分布上本質的影響を認め難い。

Fig. 5は5.5 t

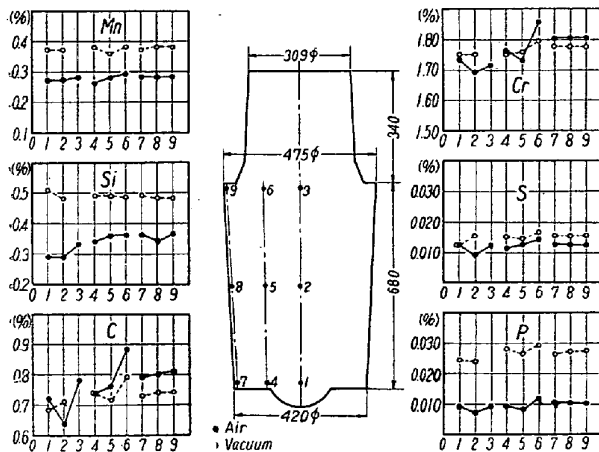


Fig. 4. Cross-sectional distribution of various elements in conventional and vacuum-cast ingots (1-t).

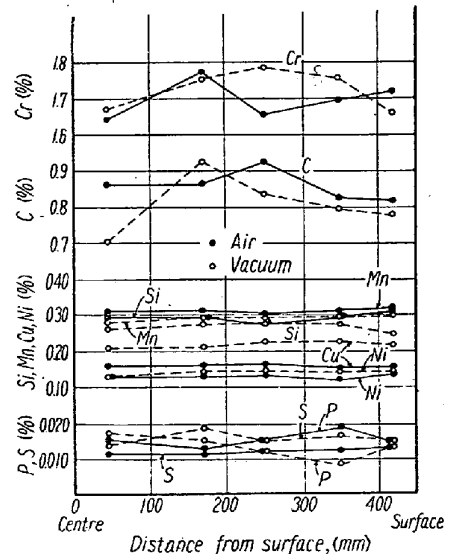


Fig. 5. Distribution of various elements in the ingot top (ingot: 5500 kg).

Table 12. Analysis of air-and vacuum-cast ingots (Cr-steel, 5.5 t).

Ingot	C%		Si%		Mn%		P%		S%		Cr%	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Air	0.81	0.86	0.30	0.32	0.27	0.30	0.013	0.018	0.011	0.013	1.64	1.85
Vacuum	0.70	0.92	0.24	0.27	0.28	0.29	0.008	0.017	0.014	0.018	1.65	1.78

鋼塊頭部断面における周辺より中心にいたる主成分の含有量を示した。

この場合も同様本質的の差は認められないが各元素の最低値および最高値を示す Table 12 によれば真空鑄造鋼塊におけるCの差が普通鋼の場合より大きく Eminger の結果⁶⁾と一致している。

Fig. 6 は酸素分析の結果で普通鋼に比較して真空鑄造鋼は明らかに低い値を示しいずれも外周部より中心部がやや高いが勾配に差は認められない。

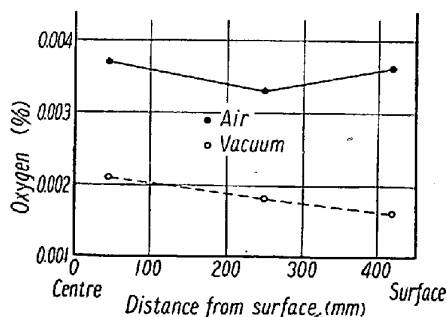


Fig. 6. Distribution of oxygen in the ingot top.

つぎに鋼塊断面各部における機械的性質の比較を行った。(Fig. 7)ただ両者の硬度がやや異なるので厳密な比較は困難であるが抗張力、降伏点ではほとんど差はないと考えられる。絞り、衝撃値では外周部の片側で大きな差を生じた。

しかし真空鑄造の影響とはいいい切れないようである。中心部はいずれも外周部に比較して劣る結果を得た。全体としてとくに顕著な差があるともいい切れない。試料数が少ないので結果を厳密に論ずることができず偏析におよぼす真空処理の効果を確認するにいたっていないが以上のごとき結果から本質的には変化がないと思われる。またサルファプリントはとくに顕著な差はなく真空鑄造の影響を認め難い。しかしゴーストは少なくともクラックを伴うものは解消される。Photo. 1, 2 に示すごとくデンドライトの発達が少ないことも真空鑄造鋼の特徴であろう。

(b) 作業工程の短縮

水素が原因するもつとも重大な欠陥は白点である。白

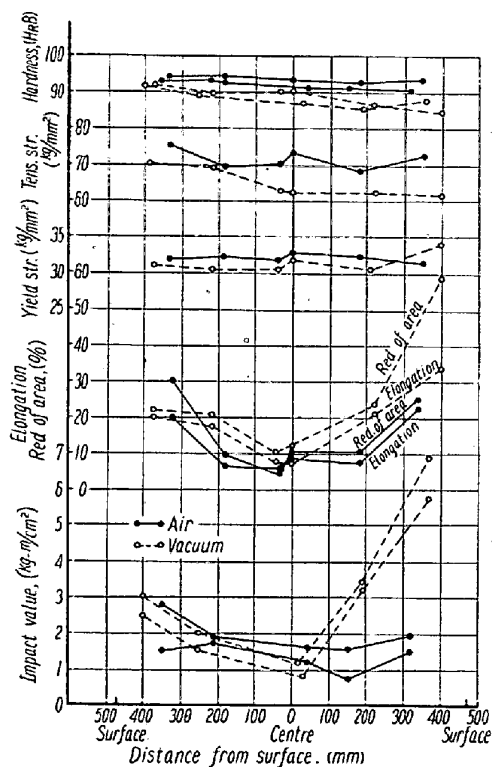


Fig. 7. Change of mechanical properties in the cross-section of the ingot top.

点防止の最善の方策は水素を減らすことで通常徐冷をくり返すことが経済的方法として採用されていた。しかし合金鋼または大きな断面を有するものにおいては水素の逃出時間を与え、冷却応力、変態応力の発生を極限することはかなり大きな犠牲である。Ni-Cr-Mo 鋼につき1/2に短縮し欠陥を生じなかつた。大気中におけるものは短縮を望むことはできない。Cr 鋼についても30%短縮し好結果を得ている。

III. 結 言

真空鑄造は万能薬ではないがすぐれた利点があり今までに認めた効果はつぎの通りである。

(1) ガスの低減: H 60%, O 30% を低減する。N はほとんど変化しない。

(2) 機械的性質の均一化: 降伏点、抗張力には変化がないが加工方向に直角の性質がよくなり、伸び、絞りは多少向上し靱性が改善される。そして機械的性質のば

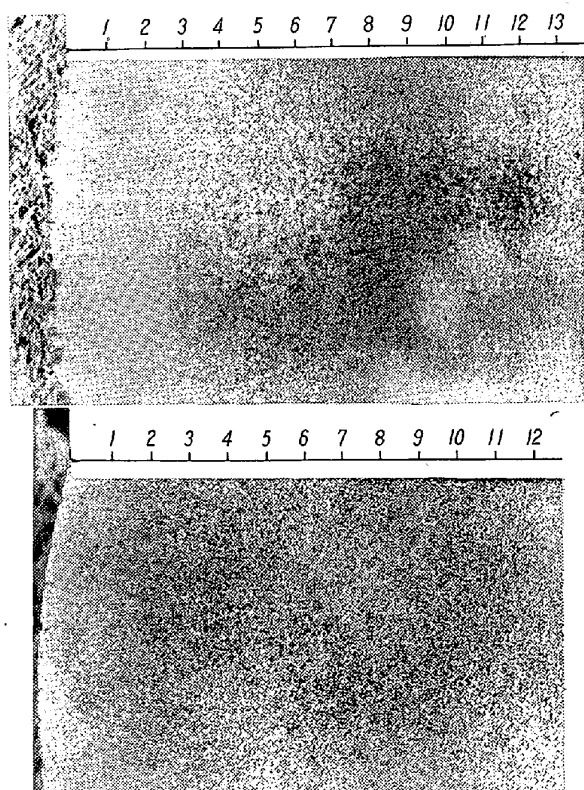


Photo. 1. Comparison of dendritic structure in air-and-vacuum-cast ingots(1000 kg).
Upper: air, lower: vacuum.

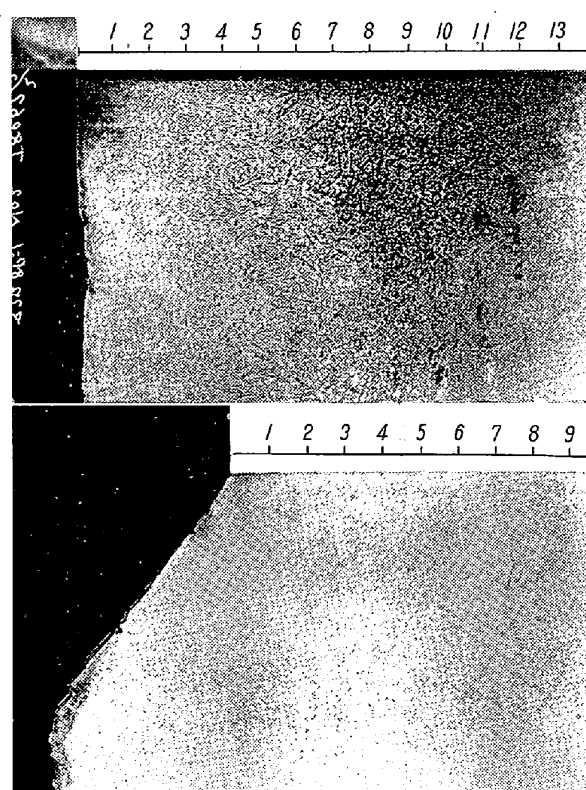


Photo. 2. Comparison of dendritic structure in air-and vacuum-cast ingots (5500 kg)
Upper: air, lower: vacuum.

らつきが少く均一化される。しかしながら飛躍的の向上を望むことはできない。

(3) 超音波試験: ほぼ絶対的である。

(4) 非金属介在物: サンドは 30% 減少し清浄鋼が得られるが表面層はむしろ普通鋼に劣る。

(5) 偏析・組織: 成分の偏析に関して効果を確認するにいたらない。デンドライトの発達が少くゴーストは少くもクラックを伴うものは解消される。

(6) 歩留: 二次パイプを減少し押湯効果を確実にする。

(7) 不良減少: 水素による欠陥は皆無となった。

(8) 作業工程の短縮: 焼鈍工程を 1/2~1/3 短縮することができる。

(昭和 34 年 4 月寄稿)

文 献

- 1) A. Tix: St. u. Eisen, **76** (1956) 2, 61~68
J. Metals, **9** (1956) 4, 420~424
Iron & Steel, **29** (1956) 3, 81~86
- 2) J. H. Stoll: Blast Furnace and Steel Plant, **46** (1958) 6, 595~605
J. Iron Steel Inst., **189** (1959) 1, 67~80
- 3) Harders, H. Knuppel & K. Brotzmann:
St. u. Eisen, **76** (1956) 26, 1721~1728
Iron & Coal Trades Review, **174** (1957) 15, 617~619
- 4) J. N. Hornak & M. A. Orechowski: J. Metals **10** (1958) 7, 471~475
- 5) K. C. Taylor: Iron & Steel Engr. **34** (1957) 10, 142~144
- 6) Z. D. Eminger, FR. Kinsky u. Z. D. Klecka: Neue Hütte., **2** (1957) 10, 590~600