

論 文

UDC 621.771.22 : 621.771.07 : 669.15'24'26'28'292-194 : 669.1.017 : 539.4.019

ロール用強靱型鋳鋼の機械的性質におよぼす合金元素の影響*

鈴木 克巳**・西 正***・牟田 徹***

Effect of Alloying Elements on the Mechanical Properties of High Strength Cast Steels for Roll Use

Katsumi SUZUKI, Tadashi NISHI, and Tōru MURA

Synopsis:

(I) The effects of further additions of Ni, Cr, V and Nb on the mechanical properties at room and elevated temperatures of conventional Ni-Cr-Mo cast steel material (SNI) have been investigated. The following results were obtained:

- (1) Vanadium addition improves the elongation and reduction of area of Ni-Cr-Mo cast steel at elevated temperatures.
- (2) Interaction effect of chromium with nickel improves the toughness and strength of the cast steel.
- (3) Niobium addition decreases the toughness.
- (4) The addition of 0.4% V, 0.75% Cr and 0.5% Ni to the conventional Ni-Cr-Mo cast steel used for roll is effective in increasing the fatigue strength and toughness and this new material seems to be suitable for slabbing and heavy plate rougher mill roll.

(II) The effects of further addition of 3.0% Ni and reduction of 0.1% C to the new material at room and elevated temperatures have been investigated and the following results were obtained:

(1) 0.4%C-1.25%Cr-4.0%Ni-0.5%Mo-0.4%V cast steel has higher tensile and fatigue strength ($\Delta\sigma_B = 23 \text{ kg/mm}^2$, $\Delta\sigma_{W10^6} = 8 \text{ kg/mm}^2$) than new 0.5%C-1.25%Cr-1.0%Ni-0.5%Mo-0.4%V cast steel has.

(2) The individual effects of chromium and nickel on the toughness are small, but the interaction effect of these two elements seems to improve the toughness under the temperature of 100°C.

1. 緒 言

分塊ロールの耐用度を向上させるためには、ロール材質の改善ばかりでなく、適正使用条件の選定が重要である。分塊ロールにおける最も大きな問題点は摩耗よりもむしろ折損事故である。これまでの折損ロールに関する諸調査の結果、分塊ロールの折損には、材質的には回転曲げ疲れ強さ、衝撃疲れ、熱疲れなどの影響が大きく、この面からみて、現在使用中のロール材質は、更に改善する余地があると考えられる。

高温回転曲げ疲れ強さに及ぼす鋼中成分の影響を体系的に調査した例は見あたらないが、高温クリープ、熱疲れに強いことが有利であると考えられる^{1)~4)}。一方鋳鋼の熱疲れおよび機械的性質に及ぼす効果については、これまでかなりの研究があり、これらを整理すると耐折損性を高める諸要因と、添加元素、組成の関係は次のように要約される。

i) 表面き裂の発生を抑制する因子

- (a) ロール表面からの脱炭による強度低下を防止するため、Cr などによる炭化物の安定化が有効である。
- (b) き裂の大きさおよび深さを軽減するため、V, Nb, Cr などの添加による鋳造組織の微細化が効果的である。
- (c) ロール材質の強靱化が必要で、このためには
 - (i) 基地の強化 (Cr, Mo)
 - (ii) 析出強化 (Cr, Mo, V, Nb)
 - (iii) 鋳造組織の微細化 (V, Nb)
 - (iv) 焼戻し抵抗の増加 (Cr, Mo)

などの諸対策が考えられる。また組織を均一にし、しかも切欠き靱性を高めるため、Ni, Cr, Mo などを利用して焼入性を高め質量効果を軽減する施策がとられる。

ii) 疲れき裂の伝播を抑制する因子

- (a) 切欠き靱性が高い方が有利である。前報⁵⁾でも述べたとおり、分塊ロール耐用度 (寿命) と折損破面

* 昭和 48 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 49 年 6 月 4 日受付 (Received June 4, 1974)

** 新日本製鉄(株)製品技術研究所 (Products Research and Development Laboratories, Nippon Steel Corp. 5-10, Fuchinobe, Sagamihara 229)

*** 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yahata Works, Nippon Steel Corp.)

中の脆性破面率の間には相関が認められ、切欠き靱性、延性、衝撃値の高い方が望ましい。

(b) 切欠き疲れ強さが高いことが有効である。分塊ロールは、使用初期に熱き裂が成長して生じた切欠きをもつたまま使用に供され、たとえロール旋削を行なっても完全に除去されない。したがって、切欠き疲れ強さが実用上重要因子になるが、一方実体ロールは、粗い鑄造組織、諸内部欠陥等の切欠きを無数に内蔵したものであるから、この見地からみれば、ロール表面の熱き裂の影響は稀釈され、ロール材の切欠き疲れ強さは、平滑材の疲れ強さで代用することができる。

上記の点を考慮しながら、耐久性の優れた分塊ロール材を開発するために本研究では各種添加元素の効果を調べた。添加元素を加えた場合その材料には当然従来のものと異なつた、それ自身の適切な熱処理条件があるはずであるが本報ではまず熱処理は従来の材料と同一条件で調べ、熱処理条件については今後の問題とした。さて有効な添加元素としてとくに Cr, Ni, V, Nb などを取りあげ、現行分塊ロールの中で比較的耐折損性に優れ、切欠き感受性が低いと考えられる Ni-Cr-Mo 系鋳鋼(SNI 系)を基本成分とし、この常温および高温の機械的性質、平滑材の疲れ強さに及ぼす上記元素の単独および複合添加効果を定量的に明らかにすることを試みた。

この実験から推定された優れた成分系については、実用ロール(特殊 SNI-1)の試作試用を行なうとともに、さらに強靱なロール材の開発を目的とし、上記実験結果をふまえて、Ni 3% 以上の鋳鋼における C, Cr, Ni などの交互作用について調べ、前述の結果と比較しながらさらに強靱かつ疲れ強さの優れた鋳鋼を開発した。

2. SNI 系 鋳 鋼

2.1 実験方法

現在使用されている Ni-Cr-Mo 鋳鋼 (SNI, 0.5%C-0.5%Cr-0.5%Ni-0.5%Mo) を基本成分とし、これに対する合金成分の影響として、今回取上げたものの種類と量は次のとおりである。

Ni 1.0~2.0%, Cr 0.5~1.25%, Mo 0.5~1.0%,
V 0.2~0.4%, Nb 0~0.3%

これらの影響を系統的に検討するため、Fig. 1 の線点図に従つて、Ni, Cr, Mo, V, Nb などの各成分を、 $L_{16}(2^{15})$ の直交配列表によつて、わりつけた。

そして、その目標組成に従つて溶製した各種鋳鋼の化学成分を、Table 1 に示す。なお Table 中 No 17 は比較材として、現行 SNI の成分系を、他の試験材と製造条件を同一にして溶製したものである。

溶製した各 20 kg 鋼塊は、いったん冷塊にした後、現行ロール製造工程に準拠した熱処理を施した。Fig. 2 は

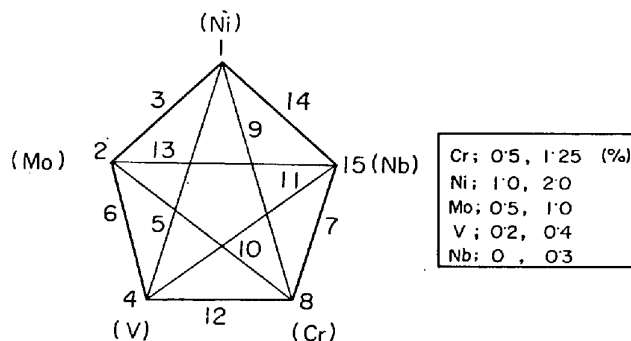


Fig. 1. Line-dot diagram used in analysis of variance.

Table 1. Chemical compositions of cast steels used. (wt %)

Ingot No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Elements
1	0.51	0.41	0.82	0.005	0.006	0.49	1.02	0.50	0.24	0.01	Ni + V
2	0.50	0.43	0.85	0.009	0.009	1.24	1.00	0.51	0.25	0.34	Cr + Ni + V + Nb
3	0.51	0.44	0.82	0.008	0.007	0.50	1.00	0.52	0.41	0.34	Ni + V + Nb
4	0.51	0.43	0.83	0.007	0.010	1.25	1.01	0.53	0.41	0.01	Cr + Ni + V
5	0.51	0.43	0.82	0.008	0.007	0.50	1.01	0.97	0.20	0.32	Ni + Mo + V + Nb
6	0.51	0.44	0.82	0.007	0.008	1.25	1.01	0.99	0.20	0.01	Cr + Ni + Mo + V
7	0.49	0.43	0.79	0.006	0.007	0.51	1.00	1.00	0.41	0.01	Ni + Mo + V
8	0.48	0.44	0.77	0.009	0.009	1.24	1.00	1.00	0.41	0.31	Cr + Ni + Mo + V + Nb
9	0.50	0.42	0.80	0.010	0.010	0.50	2.05	0.51	0.19	0.32	Ni + V + Nb
10	0.51	0.43	0.83	0.010	0.013	1.24	2.04	0.52	0.19	0.01	Cr + Ni + V
11	0.50	0.41	0.80	0.008	0.009	0.51	2.05	0.51	0.44	0.01	Ni + V
12	0.50	0.43	0.83	0.013	0.013	1.24	2.02	0.51	0.45	0.31	Cr + Ni + V + Nb
13	0.50	0.43	0.81	0.009	0.011	0.51	2.05	0.98	0.19	0.01	Ni + Mo + V
14	0.50	0.44	0.84	0.014	0.015	1.25	2.06	0.98	0.19	0.33	Cr + Ni + Mo + V + Nb
15	0.50	0.46	0.83	0.013	0.015	0.52	2.05	0.99	0.41	0.34	Ni + Mo + V + Nb
61	0.50	0.43	0.83	0.008	0.014	1.24	2.05	0.99	0.41	0.01	Cr + Ni + Mo + V
17	0.51	0.38	0.77	0.005	0.006	0.49	0.50	0.48	0.01	0.01	Base metal

その熱サイクルで、拡散焼なまし、(D) セメンタイトの球状化焼鈍 (G) は、いずれも現場熱処理条件、質量効

果を考慮して決めたものである。実体ロールでは、オーステナイト化処理 (A) および焼もどし処理 (T) が行なわれるが、この効果を受けるのはロールの比較的表層部で、切欠き靱性、疲れ強さが特にロール折損との関連

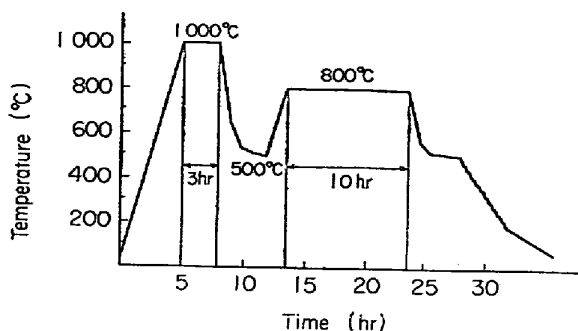
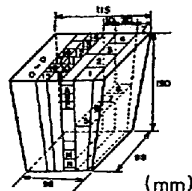


Fig. 2. Heat treatment of cast steels used.



1-8 ; Tensile test specimen
9-18 ; Rotating bending fatigue test specimen
A-N ; Impact test specimen
O-Q ; Heat check test specimen

Fig. 3. Sampling positions of the specimens from the ingot.

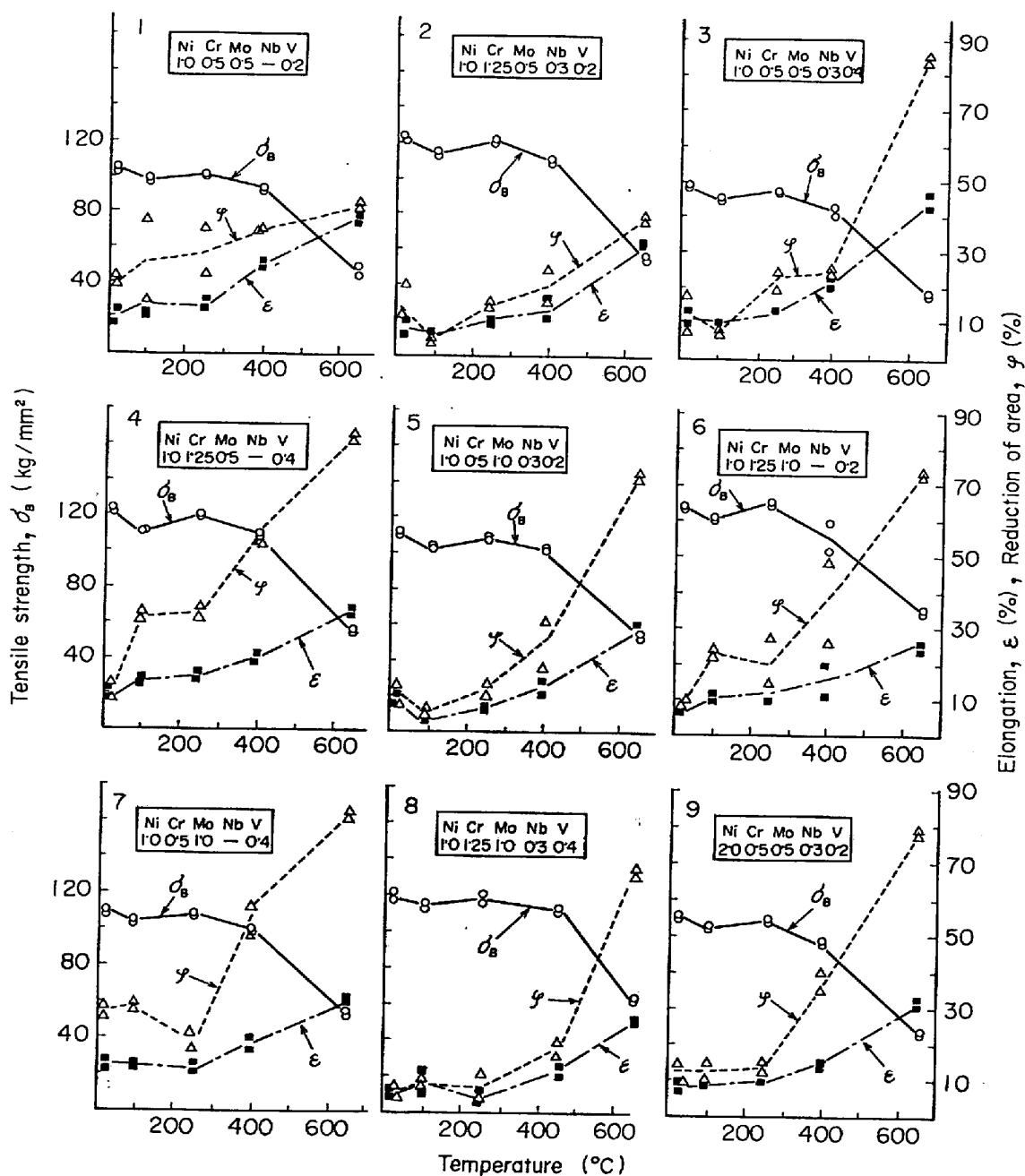


Fig. 4. Effects of temperature on tensile strength, elongation and reduction of area. (Specimen No 1~9)

で重要な内部には、事実上これらの処理効果は及んでいない。したがって、熱衝撃試験片に対しては、D.G.A.T 処理を施したものとする必要があるが、引張、疲れ、衝撃試験片は、A. T 処理を施さないものの方が好ましいと考え本実験ではこの処理を省いた。

熱処理後、鋼塊より Fig. 3 の要領で、高温引張試験片、高温回転曲げ疲れ試験片、衝撃試験片 (JIS 3 号)、熱衝撃試験片などを採取した。試験片の形状寸法は前報⁶⁾に示したものと同一である。熱衝撃特性は、鋳塊より 50 mm ϕ $\times$ 30 mm の試験片を切出し学振式試験 (恒温炉

に保持後水冷、この操作を繰返す) を行なった。なお、本研究では、耐折損性に主体をおき、耐摩耗性については実験していない。

2.2 結果と考察

2.2.1 機械試験課

常温および高温における引張試験結果を Fig. 4, Fig. 5 に示した。図中左上の数字は試料符号を表わし、主要添加成分を各図内に示した。No 3 以外の Nb 添加材は 400°C 以下の伸びが特に低い。標準材 No 17 の引張強さは最も低く、しかも、ロール材として必要な 150~

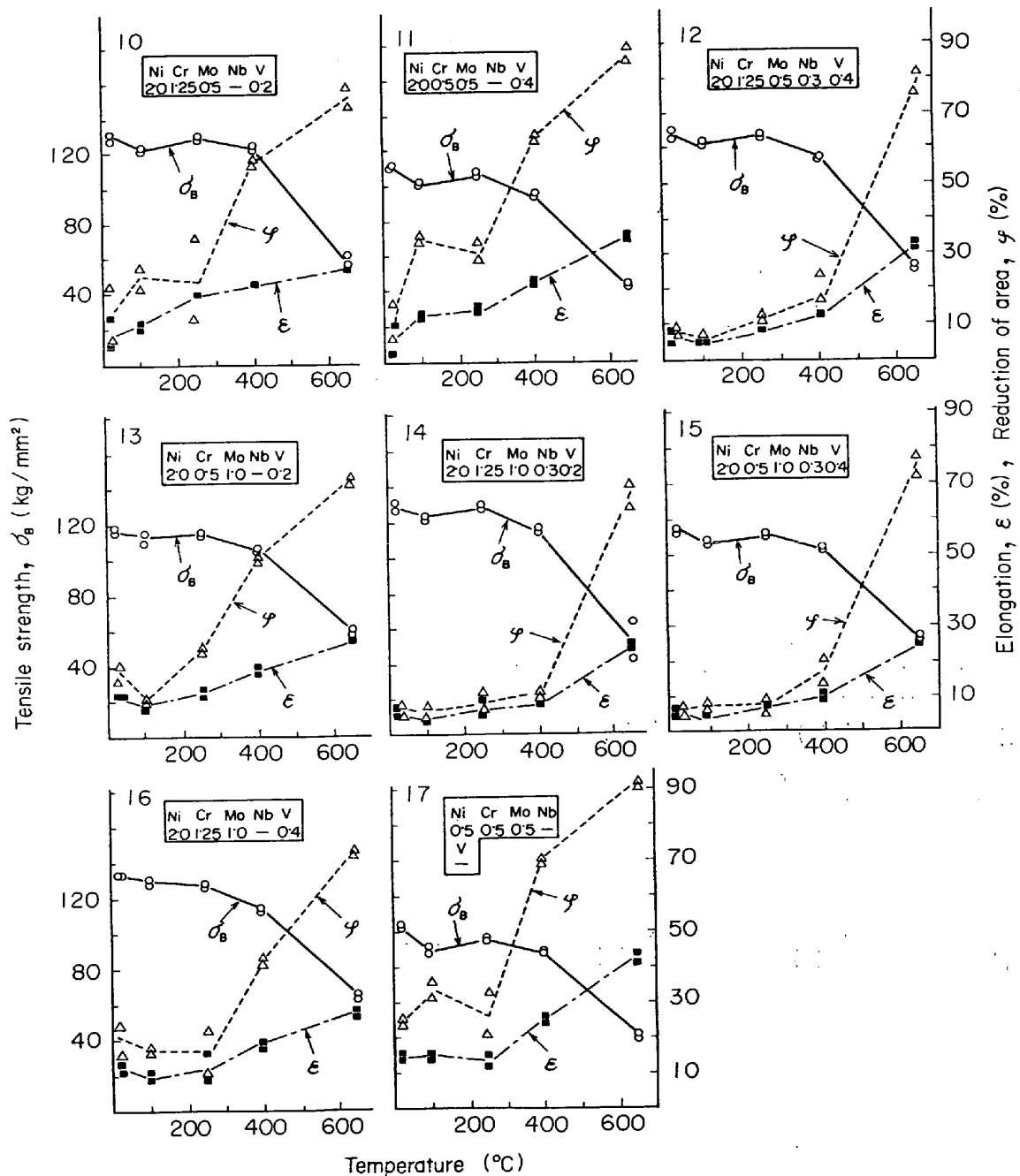


Fig. 5. Effects of temperature on tensile strength, elongation and reduction of area. (Specimen No 10~17)

250°C 間の伸び絞りも高くない。全鋼種とも引張強さの低下は 400°C 以上で特に大きく、伸び絞りの増加は、250°C 以上が大きい。したがって、引張強さ、伸び、絞りのいずれも高い温度範囲は 250~400°C 間である。

圧延中、ロール温度は最高約 200°C まで達するので、常温~200°C 間の靱性（伸びを含む）がロール材には必要である。Fig. 4 と Fig. 5 から、標準材 No 17 の 150~350°C 間の伸びと絞りは、高 Ni 高 Cr 系鋳鋼 No 10 および V 系鋳鋼 No 4 および No 11 より劣ることがわかる。Fig. 6 に衝撃遷移曲線を○印で示す。Nb 添加材 (No 2, 3, 5, 9, 12, 14, 15) の衝撃遷移特性は、No 3 の試験材を除いて、すべて高温において吸収エネルギーが低く、遷移温度が高い。合金元素添加量の少ない鋳鋼 (No 1, No 17) は、衝撃エネルギーが高く、300°C 以上でこの傾向が顕著である。100~180°C の温度範囲においては、高 Ni, 高 Cr 系鋳鋼 No 10 と No 16 は、合金元素の少ない鋳鋼 (No 1, No 17) および V 系鋳鋼 (No 11, No 4) と大差ない。同図に破面遷移曲線を・印で示す。

Nb 添加材は No. 3 を除いて 400°C 以上にならないと、延性破面率は増加しないが、添加しないものは、200°C 以上での増加が著しい。

Fig. 7 に硬さ-温度線図を示す。硬さが温度にほぼ比

例して減少するタイプ (No 4, 5, 6, 14) と、400~500°C までの減少量が少なく、400~500°C 以上で急激に低下するタイプとがある。硬さが温度にほぼ比例して減少する傾向は Fig. 4, Fig. 5 の引張試験結果からは認められなかった。高 Ni 高 V 系鋳鋼 (No 11) は 500°C 以上で、高 Ni 高 Cr 系鋳鋼 (No 10, No 16) は 400°C 以上で硬さの低下が著しくなる。標準材 (No 17) の硬さは最も低い。

Fig. 8 に 100°C における各種鋳鋼の S-N 線図を示す。また Table 2 に 100°C における疲れ限度比を示す。

標準材 (No 17) の 10^6 回疲れ強さは約 40 kg/mm² であり、No 3, No 11 などのごとく特に疲れ強さのひくい材料を除くと、他の材料の疲れ強さは標準材より高くなる。No 3, No 11 はいずれも Cr, Mo が低水準で V が高水準の材料である。No 12, No 14, No 16 はいずれも疲れ強さが高い。これらはいずれも Ni, Cr が高水準で、Mo, V のいずれか一方 (No 12, No 14) または両者が (No 16) 高水準である。Cr, Ni, V が高水準で Nb が添加されていない No 4 も疲れ強さが高い。しかし Ni, Cr, Mo, V のいずれもが高水準で Nb が添加されていない No 16 が最も強い、疲れ限度比は Table 2 から明らかなごとく、標準材 No 17 が 0.44 で最も高く、疲れ強さの高い No 12, 14 は 0.42

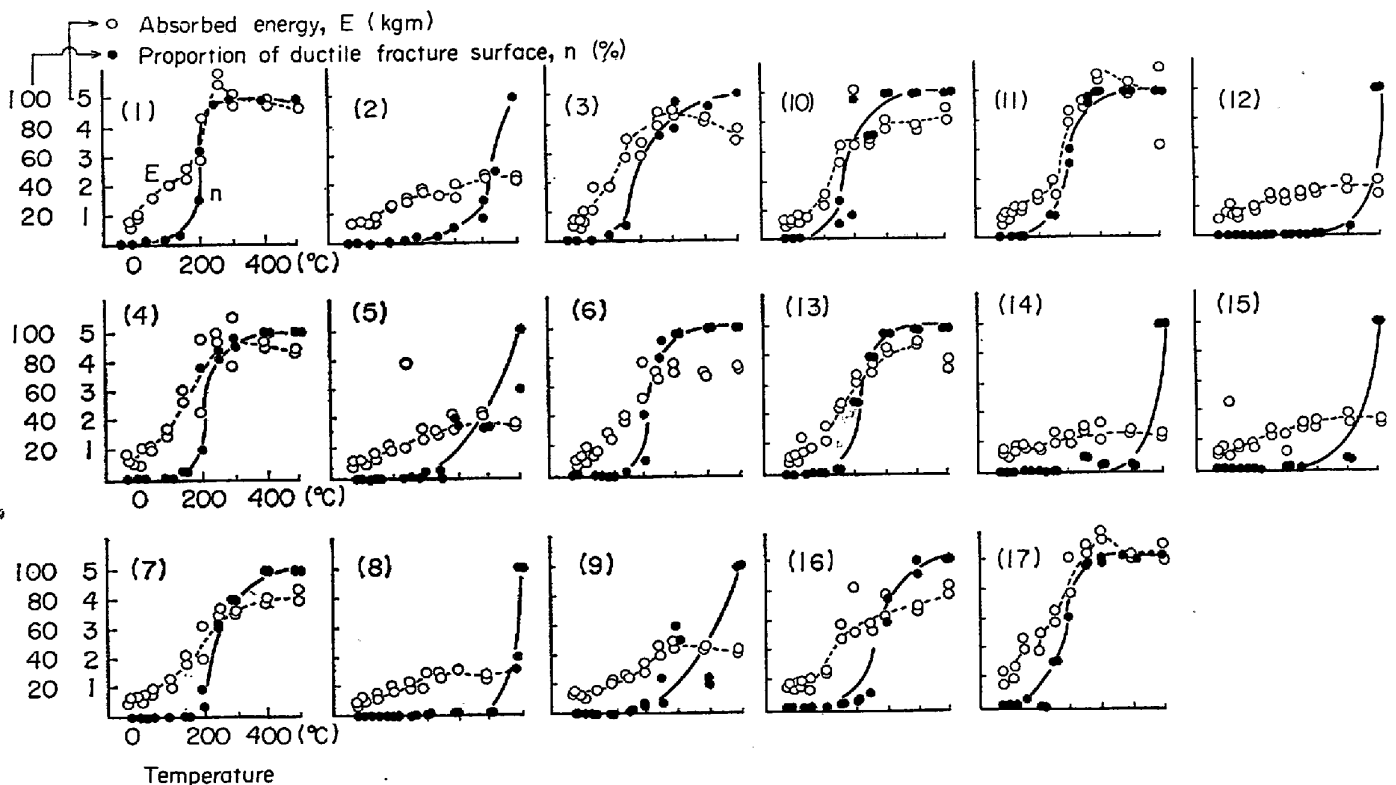


Fig. 6. Effects of temperature on absorbed energy and the proportion of the area of the ductile fracture surface in the impact test.

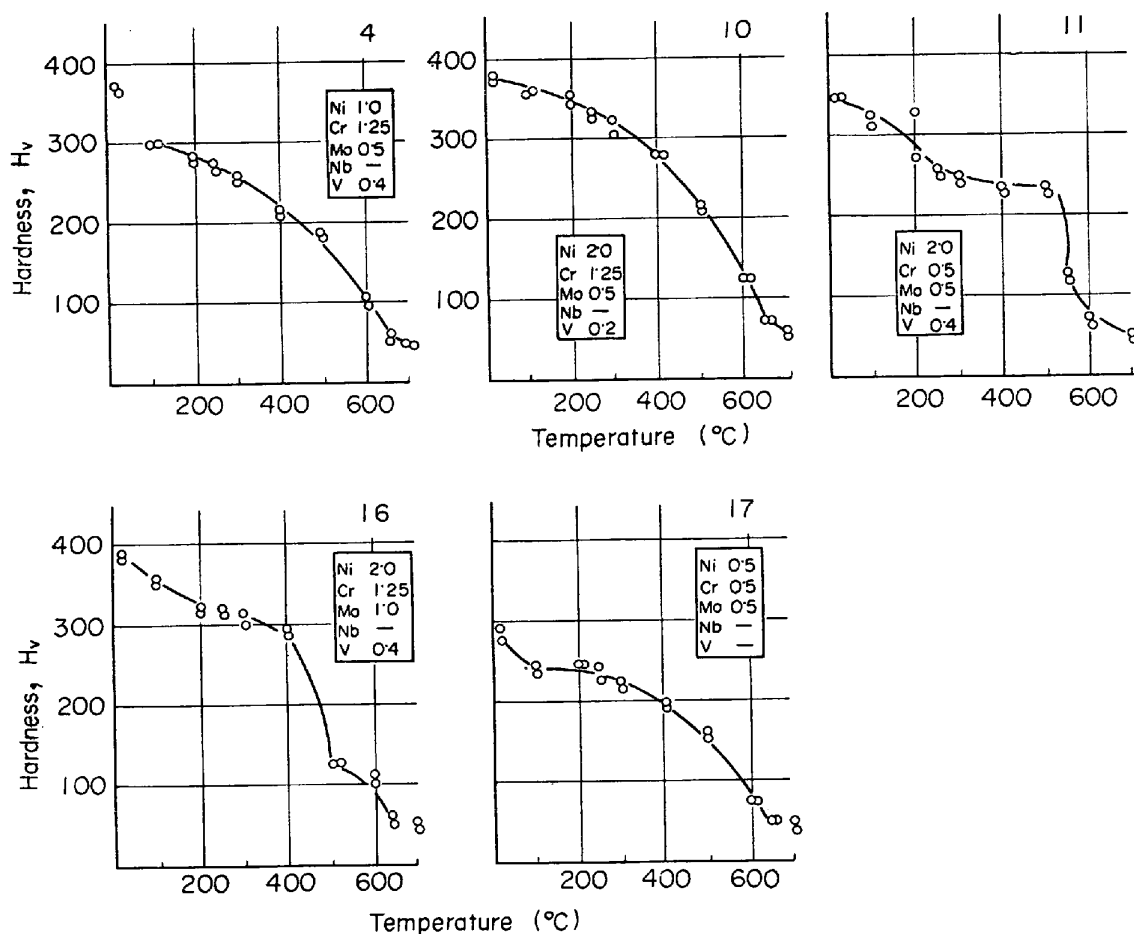


Fig. 7. Effect of temperature on hardness.

 Table 2. Fatigue strength δ_{W-10^6} , tensile strength σ_B , and these ratio (σ_{W-10^6}/σ_B) at 100°C.

Ingot No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Test item																	
Fatigue strength at 100°C σ_W	40	42	30	46	45	47	42	48	44	43	38	51	46	52	40	49	40
Tensile strength at 100°C, σ_B	99	113.9	90.5	117.6	104.9	122.6	105.1	117.0	106.0	124.1	103.1	122.6	111.1	122.9	107.7	125.6	90.5
σ_W/σ_B	0.40	0.37	0.33	0.41	0.43	0.38	0.40	0.41	0.42	0.35	0.37	0.42	0.41	0.42	0.37	0.39	0.44

で No 17 とほぼ等しい、最も疲れ強さの高かつた No 16 は 0.39 でやや少ない。

ロール材には、耐熱き裂性、疲れ強さのほかに、強さ、伸び、絞り、衝撃強さ（以下これらを総括して強靱性と呼ぶ）が要求される。強靱性を判断する方法として、常温～650°C の各温度における、引張強さ、伸び、絞り、衝撃エネルギー（衝撃試験は 500°C 以下）線図を用いた。Fig. 9～Fig. 13 にこれらの線図を示す。図中直線は、引張強さ-伸び、引張強さ-絞り、引張強さ-衝撃

エネルギーなど諸特性が優れた。上位 6～7 鋼種を選定するために設けた基準線である。この基準線は厳密には最小 2 乗法を用いて決めてひくのが妥当と考えられるが、選定する鋼種はせいぜい数鋼種で実地試験を進める場合はこのうち特に優れているものだけにしたいと考えたので、厳密な判定を行わなくても、選定できると判断し、上位 6～7 準位のものが選べるように設定した。このため基準線の勾配は鋼種により多少異なっている。同図によれば、強靱性に優れた材料ほど、右上の領域に

プロットされることになり、強靱性の優劣を判断することが可能である。この直線を基準にして強靱性の優れているものを各温度ごとに選出し、試料番号に対する特性

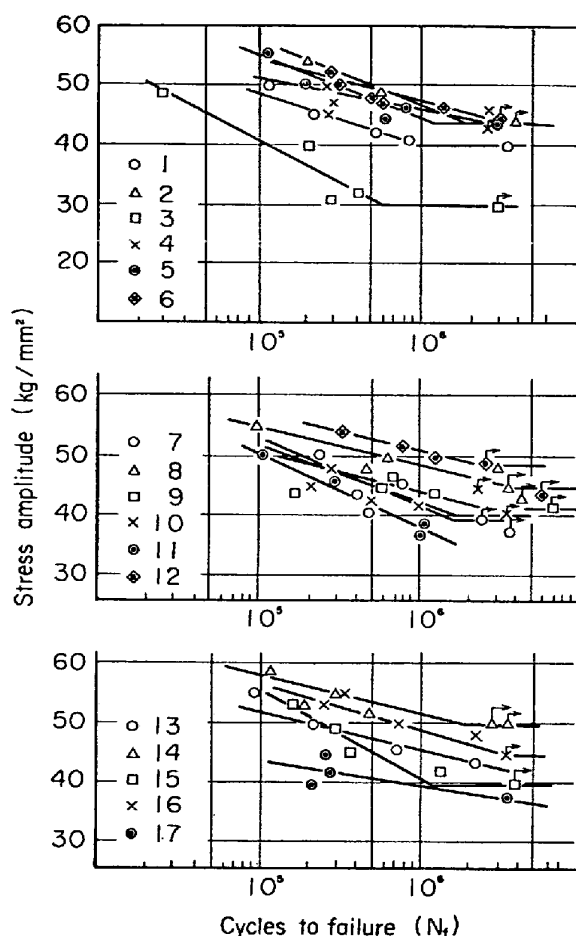


Fig. 8. Results of fatigue test under rotating bending stress at 100°C using Crause type machine (3000 r.p.m.)

を温度別に、Table 3 に示した。同表より常温～650°C で強靱性に優れたものは、試料番号 No 4, No 10, No 16 と判定された。以上 3 鋼種の主成分はそれぞれ

No 4 1.25Cr 1.0Ni 0.5Mo 0.4V

No 10 1.25Cr 2.0Ni 0.5Mo 0.2V

No 16 1.25Cr 2.0Ni 1.0Mo 0.4V

でこれらはいずれも Cr 量が高く、Nb を含有しない点 が共通している。No 4 は高 Cr-高 V, No 10 は高 Cr-高 Ni, No 16 は、高 Ni-高 Cr-高 Mo-高 V でコスト 面から No 4 が実用性が高い。

また標準材 No 17 より悪いものは、No 2, 3, 5, 8, 9, 15 でこれらの材料はすべて Nb を含んでいる。含 Nb 材でこれらのグループに入らないものは No 12 お よび No 14 で、強靱性の点で標準材と同等である。ま たこの 2 鋼種は共に Ni, Cr, V が多い。

本研究を始めた時点で分塊ロールが圧延可能なインゴ ットの重量は約 30 万 t で、圧延中ロール回転数に換算 すると約 90 万回となる。したがって、10⁶ 回、回転曲 げ疲れ強さを比較すれば折損しやすいかどうかの判断が つくと考えた。一方 Fig. 8 の各鋼種についての S-N 線 図から疲れ限度は 5×10⁵～3×10⁶ の間にあるものが多 く、No 2 を除けば 10⁶ の疲れ強さと 10⁶ 回以上の疲れ 強さの順位は変わらないことが確認された。したがって ロール寿命が 2 倍以上になったとしても (折損までの回 転数 200 万回)、10⁶ 回の疲れ強さの比較で十分判定さ れうと考えた。

Fig. 14 に各種鋳鋼の疲れ強さ (10⁶ 回, 100°C) と引 張強さとの関係を示す。No 4, No 16 は標準材 (No 17) に比べて疲れ強さ、引張強さが高い。

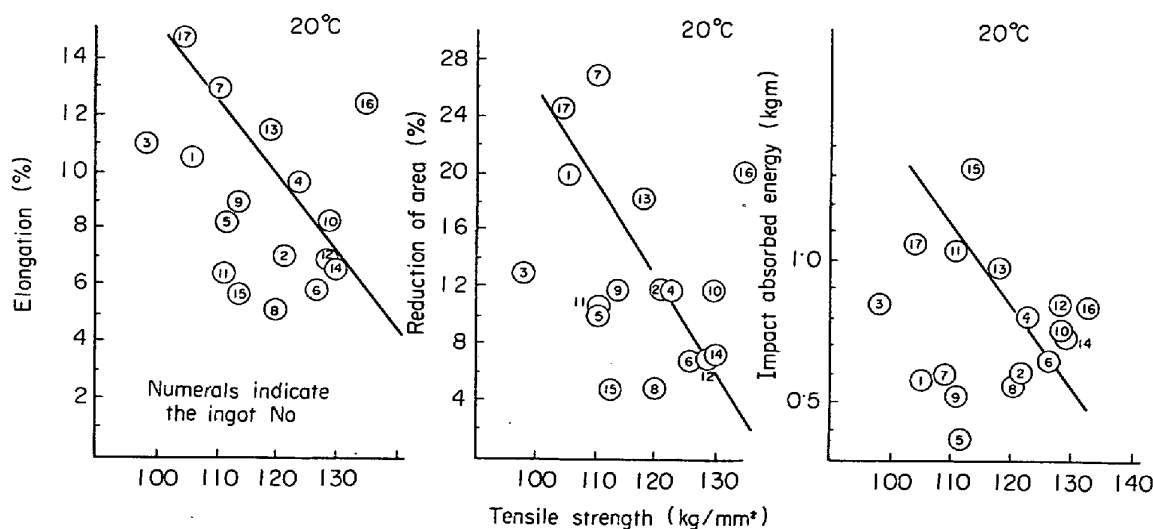


Fig. 9. Relation between elongation, reduction of area, impact absorbed energy and tensile strength at room temperature.

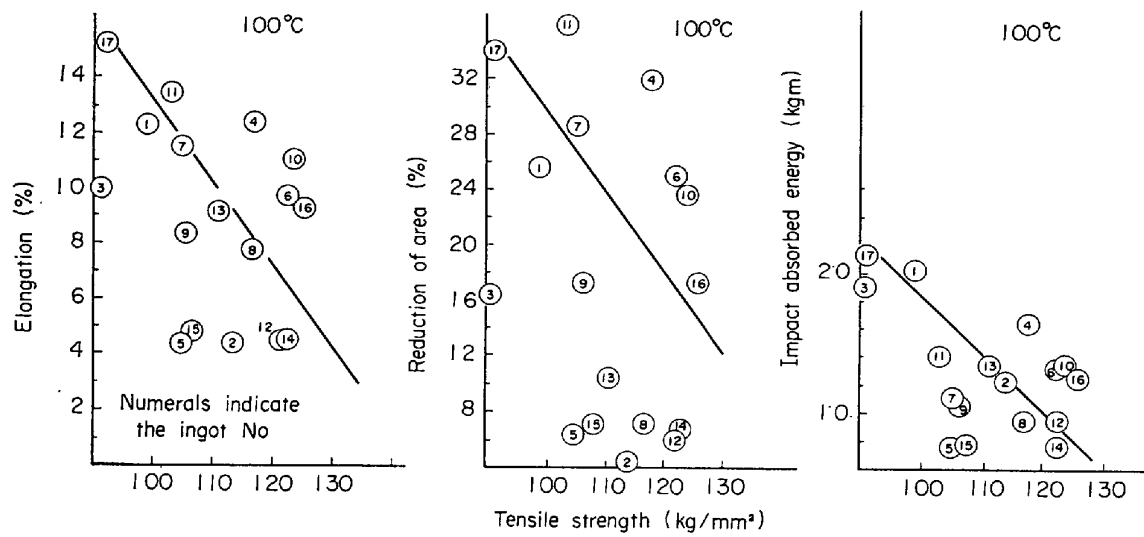


Fig. 10. Relations between elongation, reduction of area, impact absorbed energy and tensile strength at 100°C.

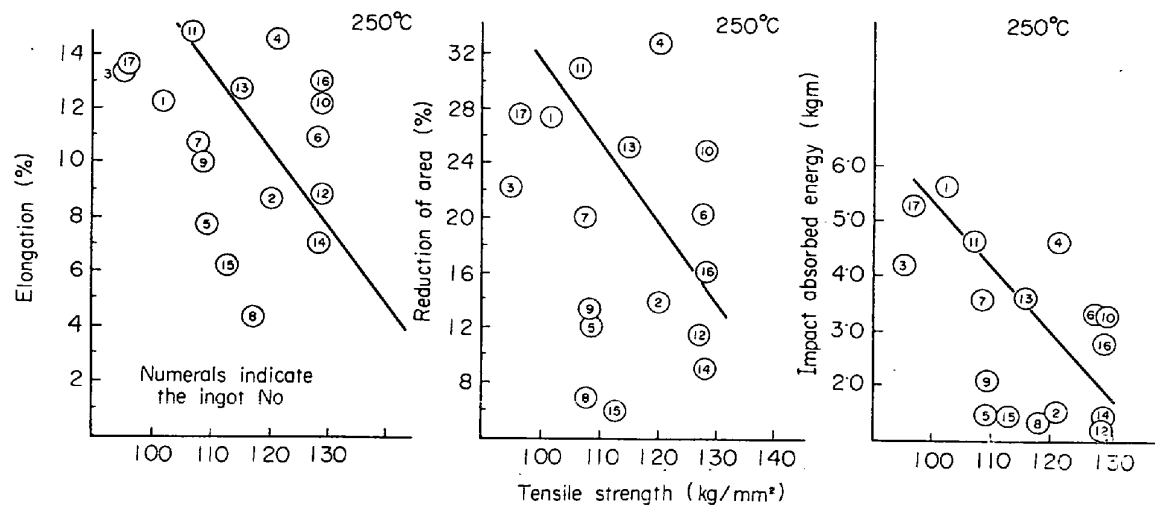


Fig. 11. Relations between elongation, reduction of area, impact absorbed energy and tensile strength at 250°C.

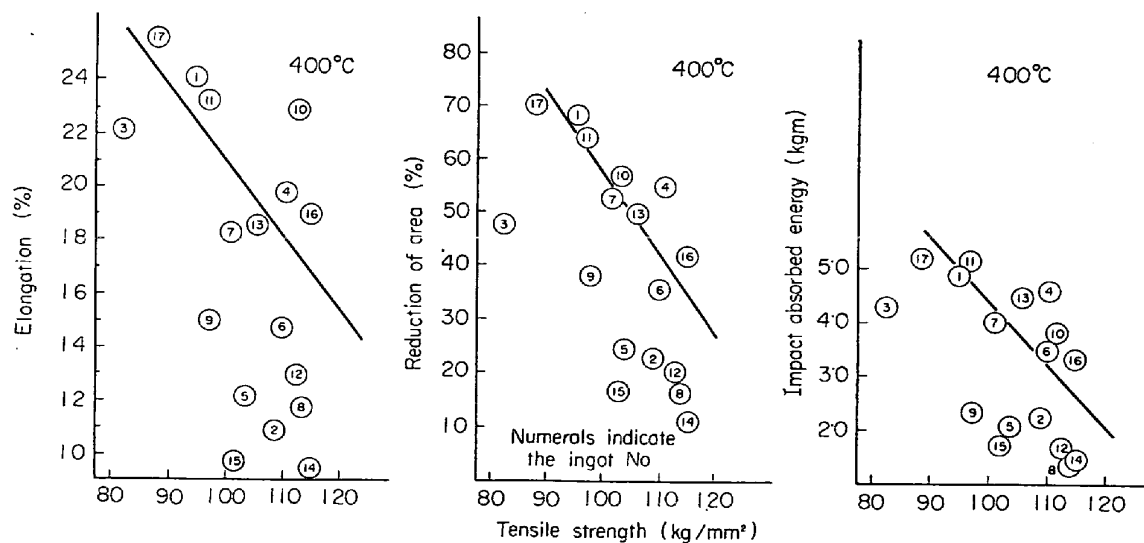


Fig. 12. Relations between elongation, reduction of area, impact absorbed energy and tensile strength at 400°C.

Table 3. Judgement of cast steels having high elongation, reduction of area and impact strength together with high tensile strength at room and elevated temperatures.

Temperature °C		20			100			200			400			650			Judgment
Test item		ε	φ	E	ε	φ	E	ε	φ	E	ε	φ	E	ε	φ	E	
Ingot No																	
1											0	0		0			3
2															0		1
3														0			1
4		0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		13
5																	0
6					0	0	0	0	0	0			0				9
7		0	0		0	0						0			0		6
8																	0
9																	0
10		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		13
11					0			0	0		0	0	0		0		6
12				0			0	0									3
13		0	0	0				0	0			0	0				8
14				0			0			0							3
15				0													1
16		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			13
17		0	0											0			3

ε; Elongation, φ; Reduction of area, E; Impact absorbed energy

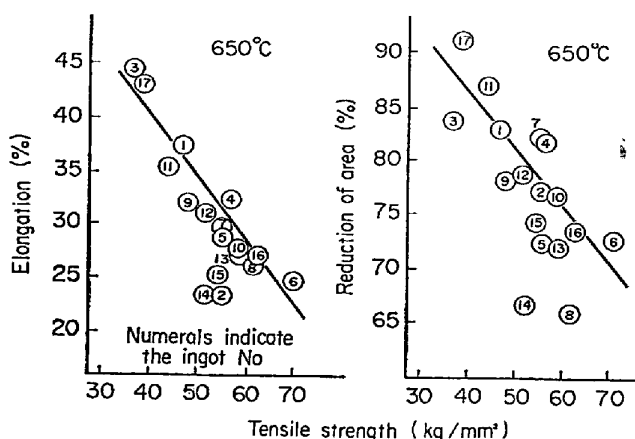
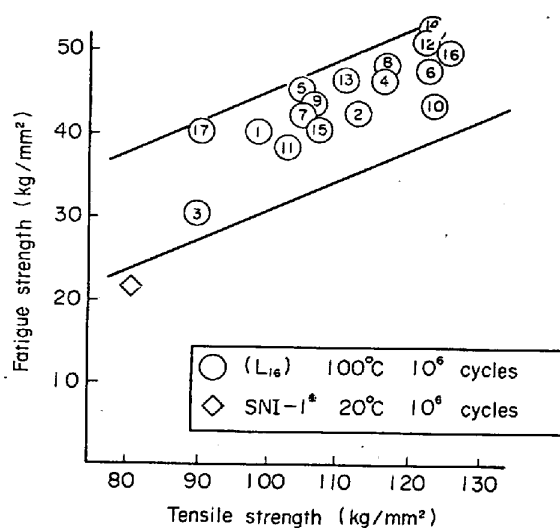


Fig. 13. Relations between elongation, reduction of area and tensile strength at 650°C.

熱衝撃試験*は、650°C に保持した炉に試験片を挿入し、650°C に到達後 5 min 保持し、水冷する操作を 300 回繰返し、表面の熱き裂発生状況を観察したが、肉眼で認めうるき裂はいずれの試料についてもほとんどなかった。しかし断面を鏡した結果、0.2 mm 以下のき裂が認められた。熱き裂の周辺に脱炭層が発達し、き裂の伝播に伴って脱炭層も内部に発達していた。また脱炭層は表面を覆いあるものは局部的に剝離していた。

各代表鋼種の 300 回熱衝撃試験後、50 mmφ の底面から入ったき裂の断面組織を、Photo. 1 に示す。この写真から脱炭層がまだまだかなり附着している場合 (No. 10) とほとんど剝離してしまっている場合 (No. 17) とがあり

* この試験片は、DG 処理後 850°C×10hr 空冷、650°C×25hr 炉冷の A. T 処理を行なった。



※ Cut from the slab mill roll

Fig. 14. Relation between fatigue strength and tensile strength.

Ni, Cr 量が関与していると考えられた。熱衝撃試験過程で表面が脱炭し酸化鉄になって剝離するが一方では、き裂を通して酸化が内部に進行している。脱炭、剝離が重量を減少し、酸化は重量を増加する。酸化による重量の増加は、表面の酸化鉄が剝離することを考えると直接大きな効果はないと考えられる。また Photo. 1 から脱炭もあまり進行していないことがわかる。したがって試験中の重量の減少は主として剝離によるものであらうと考えられる。試験片の場所によつて剝離の程度は異なると考えられ、これを一樣なものとして計算することには無理があるが、平均してどの程度の厚さになるかを、知

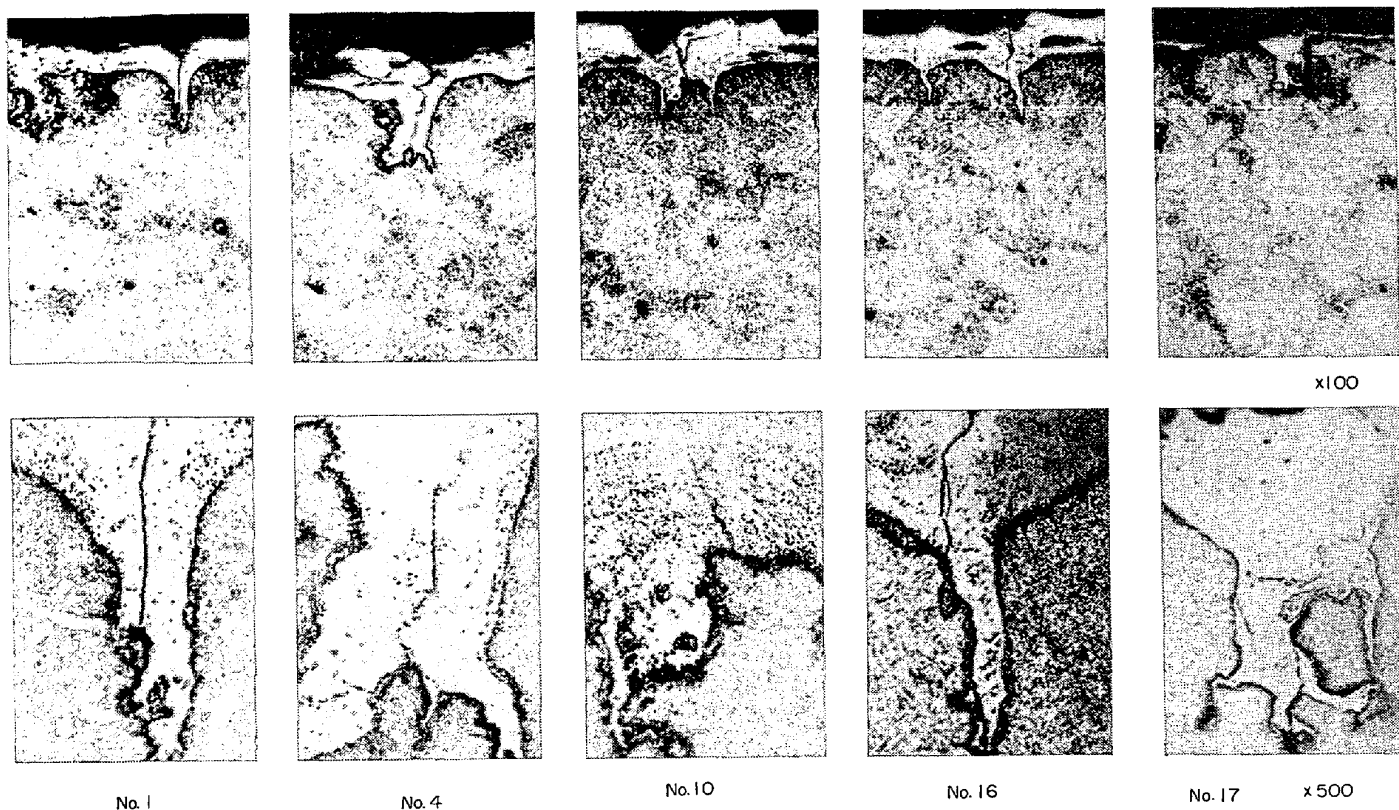


Photo. 1. The cross sections of cracks caused by heat check test cycled at 300 in the specimens cut from cast steel ingots. (testing condition : $650^{\circ}\text{C} \times 5 \text{ min} \rightleftharpoons \text{Water cooling}$)

るために減少量を測定しこれから平均剝離厚さを計算した。

すなわち、No 4 と同一成分の実体ロールから採取した試験片について調べた結果、次の点が明らかにされた。試験片の試験開始前の重量は、 442.429 g 、300 回繰返し熱衝撃試験後の重量は 436.781 g 、その差 5.648 g は、試験中酸化鉄として剝離したものと考えられる。試験片の全表面積 $2(2.5)^2\pi + 3(2.5 \times 2) = 86.34 \text{ cm}^2$ 比重 7.8 とすると、剝離した厚さ (d) は $d = 5.648 / (7.8 \times 86.34) = 0.008 \text{ cm}$ すなわち約 80μ となる。残っている酸化層を含むき裂長さは約 $100 \sim 200 \mu$ であつたので、写真で見られるき裂長さだけでなく、酸化鉄の剝離し易さも考慮しないと熱き裂性を正確に理解することは困難であろうと考えられた。

Photo. 2 に参考資料として No 4 の組成で製造した実体ロール (特殊 SNI ロール*) から採取した試験片 (DGAT 処理後) について $650^{\circ}\text{C} \times 5 \text{ min} \rightleftharpoons \text{水冷}$ の熱衝撃試験を、100, 300, 400, 500 回繰返したものの熱き裂を示す。繰返し数が多くなつても、き裂の深さが深くなるよりも、脱炭、酸化部分が厚くなる傾向が認められた。

* 特殊 SNI ロールの製造試験、実用試験成績は別報で報告する。

Photo. 1, Photo. 2 のき裂の発生状況より、き裂先端形状は鑄造組織の結晶粒界と密接な関係があると考えられ、鑄造組織の細かいものの方が熱き裂が進展しがたいように考えられた。

2.2.2 機械的性質に及ぼす化学成分の主効果および相互作用

常温、 100°C 、 250°C 、 400°C および 650°C における引張強さ伸び、絞り、硬さに対する添加成分および添加量の影響を調査するため、分散分析を行なつた結果、有意と判定された主効果および相互作用のうち、ロールの耐折損性とくに重要な因子と考えられる伸び、絞り、衝撃値などと、重要因子と判定された疲れ強さ、疲れ限度比などに効果的な要因を抽出し、温度別に Table 4 に示した。同表に従い主要な主効果および交互作用を列記すると次のとおりである。

Ni : 常温および高温の引張強さ、高温硬さ、疲れ強さを増し、 100°C 衝撃値を下げる。

Cr : 常温および高温の引張強さ、高温硬さ、疲れ強さを増し、エネルギー遷移温度を下げる。

Mo : 常温および高温の引張強さを増し、高温疲れ強さ、疲れ限度比を高め、エネルギー遷移温度、衝撃値を下げる。

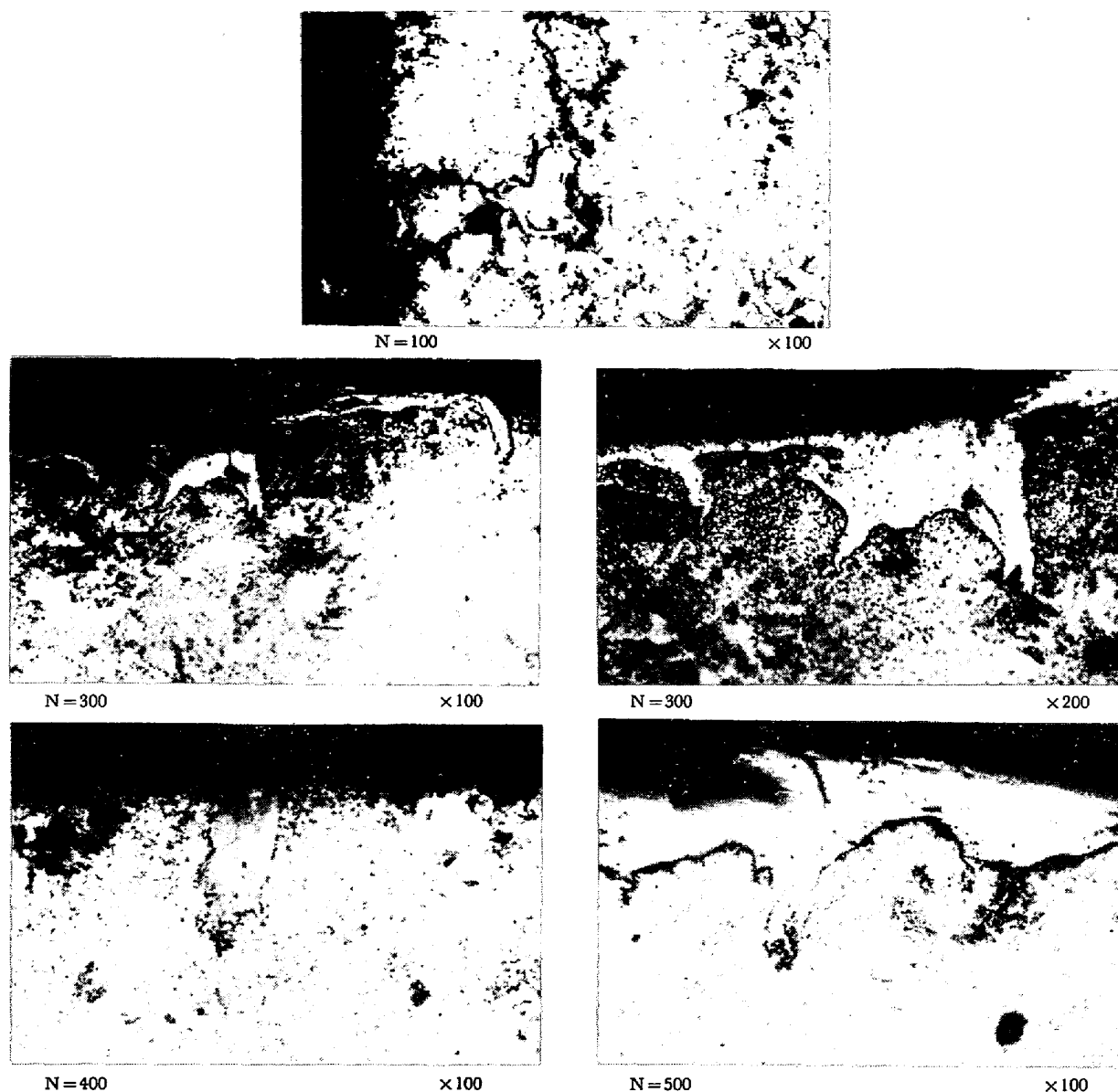


Photo. 2. Cross section of the cracks caused by heat check test cycled at 100, 300, 400, and 500 in the specimen cut from the slabbing mill roll.

V : 高温引張強さは多少低下するが, 伸び, 絞り, 硬さ疲れ限度比を高め, エネルギー遷移温度を下げる.

Cr×Mo : 引張強さ, 硬さを高め, エネルギー遷移温度を下げる.

Cr×V : 高温引張強さ, 疲れ強さを高め, エネルギー遷移温度を下げる.

Ni×Cr : 高温の伸び, 絞り, 硬さを高め, エネルギー遷移温度を下げ, 吸収エネルギーを低下させる.

Ni×V : 伸び, 絞りを高め, エネルギー遷移温度を下げる.

Ni×Mo : 高温引張強さ, 伸び, 硬さを高め, エネルギー遷移温度を下げる. また絞り, 疲れ限度比を

低くする.

Nb : 引張強さ, 伸び, 絞りなどを低下させる.

2.3 小 結 言

従来使用されてきた分塊ロール材 0.5C-0.5Ni-0.5Cr-0.5Mo 鋳鋼 (SNI-1) の常温および高温の機械的性質に及ぼす Ni, Cr, Mo, V, Nb などの影響を調べ次の点を明らかにした.

(1) 分塊ロール耐折損性に重要な性質と考えられる常温および高温の疲れ強さ, 強靱性が優れている成分系は

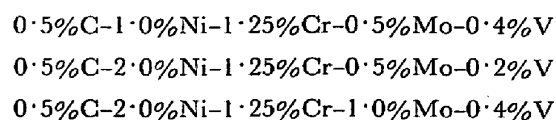


Table 4. Effects of alloying elements on the mechanical properties at room and elevated temperatures obtained by analysis of variances.

Test item Temp. °C	Tensile strength σ_B						Elongation ϵ						Reduction of area φ						Hardness Hv				Impact property		Fatigue strength 10 ⁶ σ_W 100°C	σ_W/σ_B	
	20	100	250	400	650		20	100	250	400	650		20	100	250	400	650		20	100	400	500	Trans. tem.	Absob ed E.			
Elements																											
Ni	●	●	●	△																●	●				⊙		
Cr	⊙	⊙	○	⊙	●															●	⊙	○		⊙			
Mo	●	●	●	●	△																		△	⊙		●	
V		(-)	(-)	●	(-)		⊙				⊙						●					△	△			△	
Cr×Mo	⊙	⊙	○	○																			⊙				
Cr×V				○	⊙		△															(-)	⊙		⊙		
Mo×V _{0.4}					○																						
Ni×Mo _{1.0}		△	○				○						(-)									●	●			【-】	
Ni×V _{0.2}			△		⊙		●			●	【-】		△										●	●			
Cr×Mo _{1.0}					○																		⊙		○	【-】	
Nb		(-)			(-)					⊙																	
Nb×V																										(-)	
Ni×Cr _{1.25}																								△	((-))		
Mo×Cr _{0.5}													●										●	●			
Cr×Ni _{1.0}													○														
V×Cr _{0.5}																										⊙	
																										●	

Explanation of the notations

Probability	Positive effect			Negative effect		
	Large	Medium	Small	Small	Large	
99%	○	●	△	(-)	((-))	
95%	○				[-]	

の 3 組であつた。

(2) SNI-1 鑄鋼の常温および高温の機械的性質に及ぼす Ni, Cr, Mo, V, Nb の影響を分散分析によつて調べたところ 3 次の特徴が明らかになつた。

- (i) Cr と Ni は単独では引張強さを高くするが、伸び、絞りには改善効果が認められない。しかし、Ni と Cr の交互作用は 400~650°C で伸び、絞りを大きくする。
- (ii) V は単独で、また Ni との交互作用で 100~650°C 間で伸び、絞りを大きくする。
- (iii) 0.3%Nb 添加は伸び、絞り、衝撃エネルギーを減少し、強靱性の向上に対しては好ましくない。

3. 高 Ni 系 SNI 鑄鋼

Table 4 から、①Mo は疲れ強さ、疲れ限度比を高くしエネルギー遷移温度をひくくすること、②Ni と Cr は単独で引張強さを高くするが、伸び絞りは改善しない。しかし両者の交互作用は、伸びと絞りを大きくするのに効果があること。③V および Ni と V の交互作用は、伸び絞りを大きくするのに効果的であることなどが明らかにされた。

一方 C は引張強さ、硬さを高くするが、伸び絞りが減少すると考えられる。

これらの点を考慮して V, Mo を多水準添加した Ni-Cr-Mo-V 鑄鋼に Ni をさらに多量添加し強靱性に適した Ni と Cr の組合わせを調べるとともに、C 量を少なくして伸び絞りおよび靱性を高くした鑄鋼を得ようと考え、本研究を行なつた。

3.1 実験方法

L₈(2⁷) の直交配列に従つて、C, Ni, Cr の主効果お

よび交互作用を調べた組成を Table 5 の鋼塊 No 18~25 に示す。同表 No 26, 27 は前節 2. の結果に基づいて C, Ni の効果を確認するために偵察実験に用いた高 Cr 高 Ni 系の鑄鋼であり、No 28~30 は C 効果を求めるために Cr を 1.25% にした Ni-Cr-Mo 鑄鋼の C 量を変えた材料 No 31 は Cr を 0.5% とし Ni を 3% とし V を加え C を 0.3% に下げたものである。また No 4, 10, 16 は Table 1 に示したものと同じで比較のため附記した。

これらの鋼塊を Fig. 2 と本質的に同じ要領で熱処理を行ない、Fig. 3 の要領で試験片を採取した。試験片の形状寸法は別報⁶⁾に示したものと同一である。

3.2 結果と考察

3.2.1 機械的性質

常温および高温の引張試験 および 衝撃試験結果を、Fig. 15 に示す。また図中左肩の番号 18~25 はそれぞれ試料番号に対応している。図より C の低い (0.32C) No 18~21 は、常温~300°C の引張強さ 100~140 kg/mm² 常温の伸び、絞りはそれぞれ 12~20%, 20~35% である。一方 C の高い (0.5% C) No 22~25 は引張強さ 120~170 kg/mm², 常温の伸び絞りが 2~15% と著しく減少している。これらの線図にはそれぞれ約 130°C および約 100°C に青熱脆性の傾向が認められる。すなわち、低 C 低 Ni 系 (No 18, No 19) は高 C 高 Ni 系 (No 24, 25) より高温側でこの現象が起こり、低 C 高 Ni 系 (No 20, 21), 高 C 低 Ni 系 (No 22, 23) は両者の間でこの現象が起こるようである。

Fig. 16 に衝撃エネルギー遷移曲線を示す。低 C 系の特徴は常温の衝撃エネルギーが高い割りには、高温の値が低いことである。また常温の衝撃エネルギーは、5.0

Table 5. Chemical compositions of cast steels used (%).

Ingot No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
18	0.27	0.51	0.88	0.021	0.022	0.52	3.14	1.05	0.41
19	0.30	0.46	1.01	0.020	0.021	1.17	3.06	0.98	0.42
20	0.31	0.46	0.86	0.020	0.023	0.52	5.16	1.00	0.40
21	0.30	0.47	0.86	0.020	0.022	1.15	5.16	1.01	0.42
22	0.51	0.46	0.84	0.021	0.024	0.52	3.04	1.00	0.40
23	0.51	0.47	1.04	0.020	0.022	1.03	3.04	1.01	0.39
24	0.51	0.47	0.86	0.021	0.024	0.53	5.19	1.02	0.40
25	0.52	0.49	0.86	0.020	0.023	1.07	5.19	1.04	0.43
26	0.41	0.46	0.83	0.021	0.022	1.25	3.03	0.52	0.42
27	0.41	0.43	0.85	0.020	0.024	1.25	4.02	0.51	0.42
28	0.31	0.46	0.87	0.025	0.034	1.26	0.50	0.51	0.01>
29	0.72	0.48	0.88	0.024	0.034	1.26	0.51	0.51	0.01>
30	1.01	0.48	0.88	0.026	0.030	1.27	0.51	0.52	0.01>
31	0.30	0.40	0.86	—	—	0.50	3.03	1.01	0.41
4	0.51	0.43	0.83	0.007	0.010	1.25	1.01	0.53	0.41
10	0.51	0.43	0.83	0.010	0.013	1.24	2.04	0.52	0.19
16	0.50	0.43	0.83	0.008	0.014	1.25	2.05	0.99	0.41

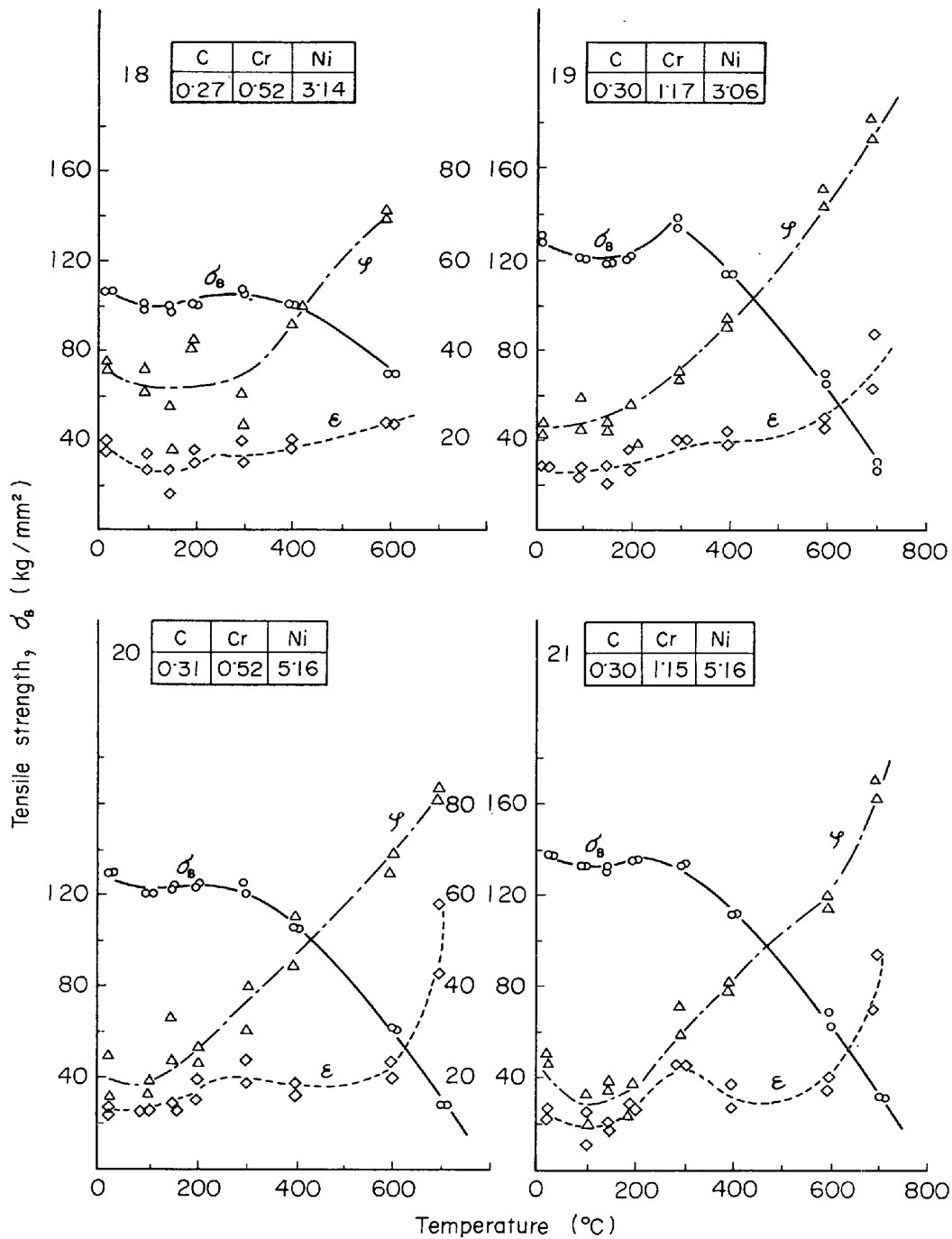


Fig. 15-1. Effects of temperature on tensile strength, elongation and reduction of area. (Specimen No. 18~21)

%Niの方がNo. 1を除いて優れているが、200~300°Cでは、3.0%Niの方がかえって優れている。高C系の場合には、衝撃エネルギーは200°Cで飽和値に達し（No. 8は例外）絶対値もせいぜい4 kgmで低C系より2~3 kgm 多い。

本研究においては耐摩耗性に関する研究は特に行なわなかつたが、耐折損性を改善する場合でも実用的には耐摩耗性も考慮すべきなので、熱延ロールの耐摩耗性が硬さ、焼戻し抵抗に依存すると考え、硬さの温度依存性

を測定した。Fig. 17 に本実験における代表的強靱鑄鋼 No. 19, No. 21, No. 26, No. 27 の硬さ温度線図を示す。前節(2)で述べた No. 4 に比べると焼戻し抵抗は、はるかに大きい。

Fig. 18 に 100°C における回転曲げ疲れ試験結果を示す。参考のため図中に 100°C での 10⁶ 回疲れ強さ、引張強さおよびそれらの比(疲れ限度比)などを示した。

これらの線図より、高Ni低C系鑄鋼 (No. 19~25 および No. 27) の S-N 線図における勾配は小さく、しか

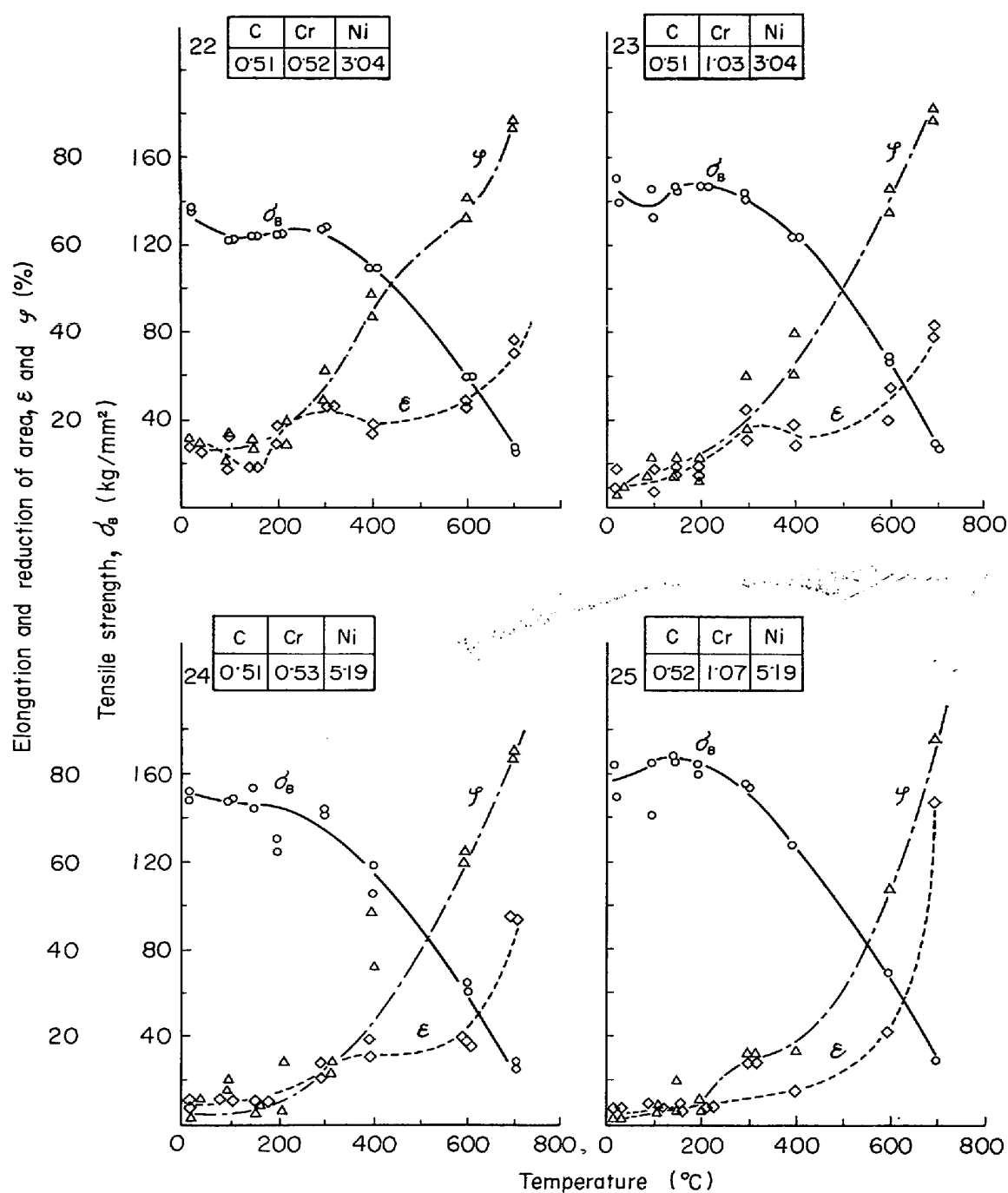


Fig. 15-2. Effects of temperature on tensile strength, elongation and reduction of area. (Specimen No 22~25)

も疲れ強さが高いことがわかる。とくに、0.3%C系で疲れ強さが高いのは、高Cr高NiのNo 21で0.5%C系では高Cr低NiのNo 23である。また高CrでNiとCが、0.4%のNo 27もこれらと同じ強さを示している。

強靱性を判定する1つの方法として、引張強さと、伸び、絞り、衝撃エネルギーとの関係を調べた。Fig. 19~23はそれぞれ、常温100, 200, 300および400°Cにおける引張強さと、伸び、絞り、衝撃エネルギーとの関

係を示すもので、図中○△印内の数字はTable 1およびTable 5に示す試験片符号である。同図には参考のため、前節(2)で述べた17鋼種のうち、特に強靱性に優れているNo 4, No 10, No 16の試験結果もプロットした。各温度での伸び、絞り、衝撃エネルギー等について、Fig. 9~13と同じ要領で基準線を設定しこれによつて強靱性の優れた鋼種を判定した。結果を表示すると、Table 6のごとくなる。末尾欄には強靱性に優利と判定された頻度すなわち○印の数を記入してある。*印

Table 6. Judgement of cast steels having high elongation, reduction of area and impact absorbed energy together with high strength

Ingot No	Temp. °C			20			100			200			300			400			Total	Remarks
	ε	φ	E	ε	φ	E	ε	φ	E	ε	φ	E	ε	φ	E	ε	φ	E		
18		0																	5	ε ; Elongation φ ; Reduction of area E ; Impact absorbed energy # ; High points
19		0	0	0	0	0		0	0			0	0	0	0	0	0	0	9#	
20				0						0				0			0		4	
21	0	0	0			0		0					0				0		7#	
22								0					0						2	
23			0																	
24																				
25																				
4					0			0					0				0	0	4	
10					0			0							0	0	0		5	
16	0																		1	12#
26	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
27	0			0		0		0	0	0	0	0	0						10#	

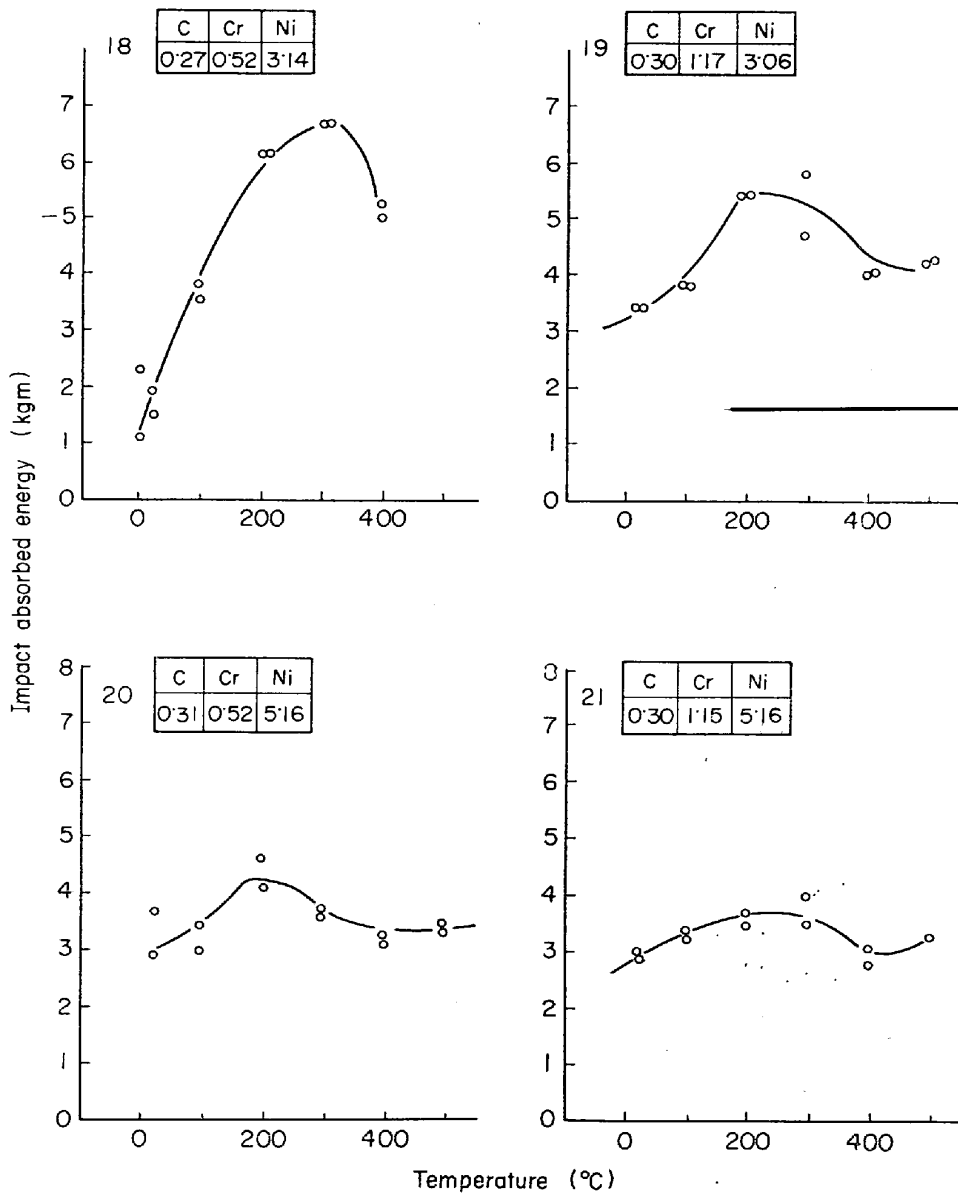


Fig. 16-1. Effect of temperature on impact absorbed energy. (Specimen No 18~21)

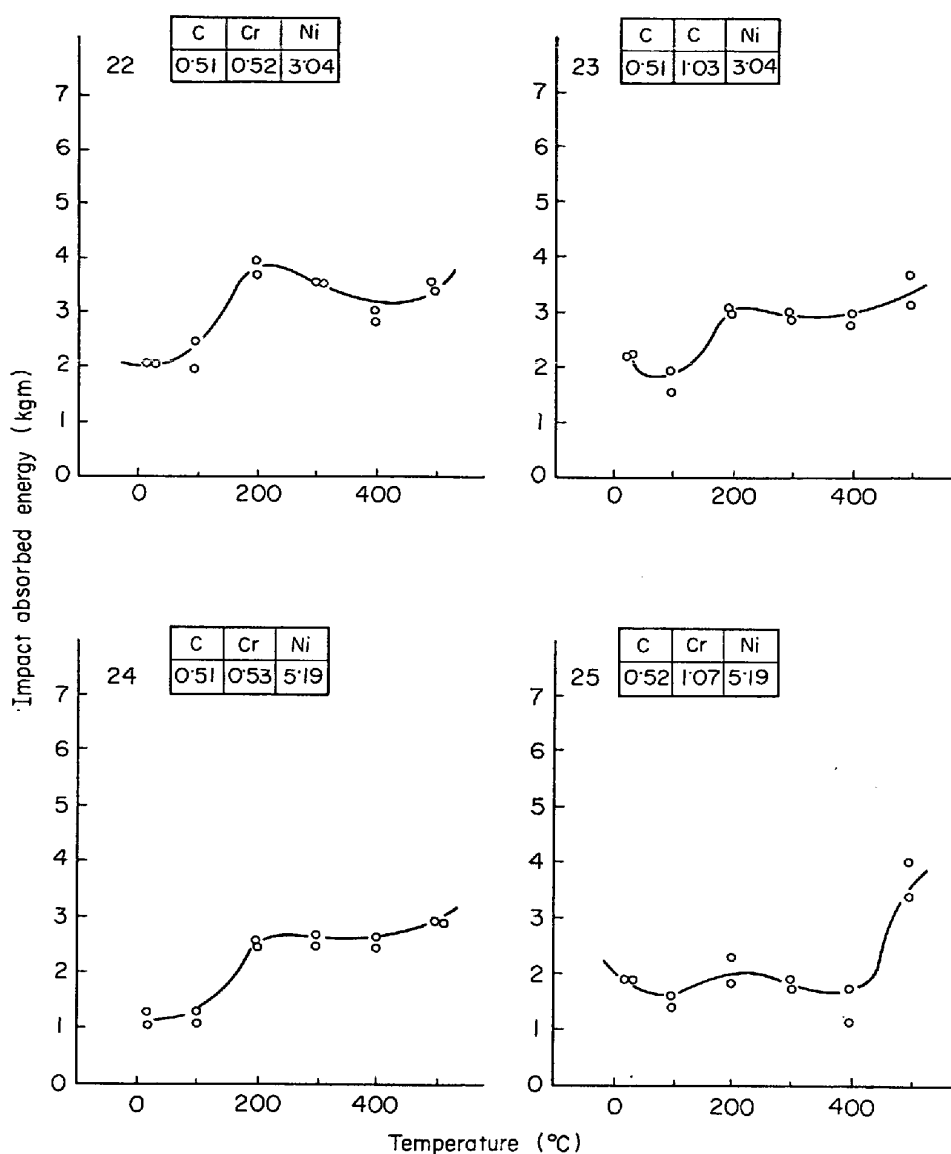


Fig. 16-2. Effect of temperature on impact absorbed energy. (Specimen No 22~25)

は特に頻度の高いものを表わす。以上の評価方法により、強靱性に優れているものを列記すると、本実験鋼の中で0.3% C および0.4% C 高 Ni 系の No 19, No 21, No 26 および No 27 となる。

3.2.2 組織

Photo. 3に D. G 処理後の組織を示す。組織はフェライト (白い部分) とペーナイト (黒い部分) でマルテンサイトが多少残っている。強靱性に富む No 19, No 21 は、ペーナイトが細かく、引張強さの低い No 18 はフェライト量が他鋼種より多い。また Ni 含有量の多い No 20, No 21, No 24, No 25 は No 25 を除けばペーナイトが細かい。高 C 系の No 22~27 は低 C 系 No 18~21 に比べマルテンサイトの発達が著しいようである。高 C 系の鋼の中で靱性の優れている No 22 のフ

エライトの粒状化は、他の鋼より進行している。

以上の観察結果より、マルテンサイトを消滅させて、フェライトの粒状化を促進しペーナイトを緻密にすれば強靱性を付与することができそうである。

900°C に 1 hr 保持後空冷し、さらに 700~800°C で 10hr 処理した No 21 鋼組織の 1 例を Photo. 4 に示す。この結果からフェライトを粒状化し、炭化物を球状化して、マルテンサイトを消滅させるには、A₃ 点近くで熱処理するのが良いようである。No 21~23 は 770~800°C での球状化処理が効果的である。

3.2.3 機械的性質に及ぼす化学成分の主効果および相互作用

各試験材の常温および高温における引張強さ、伸び、絞り、衝撃値に関し、各元素の影響を調査するために、

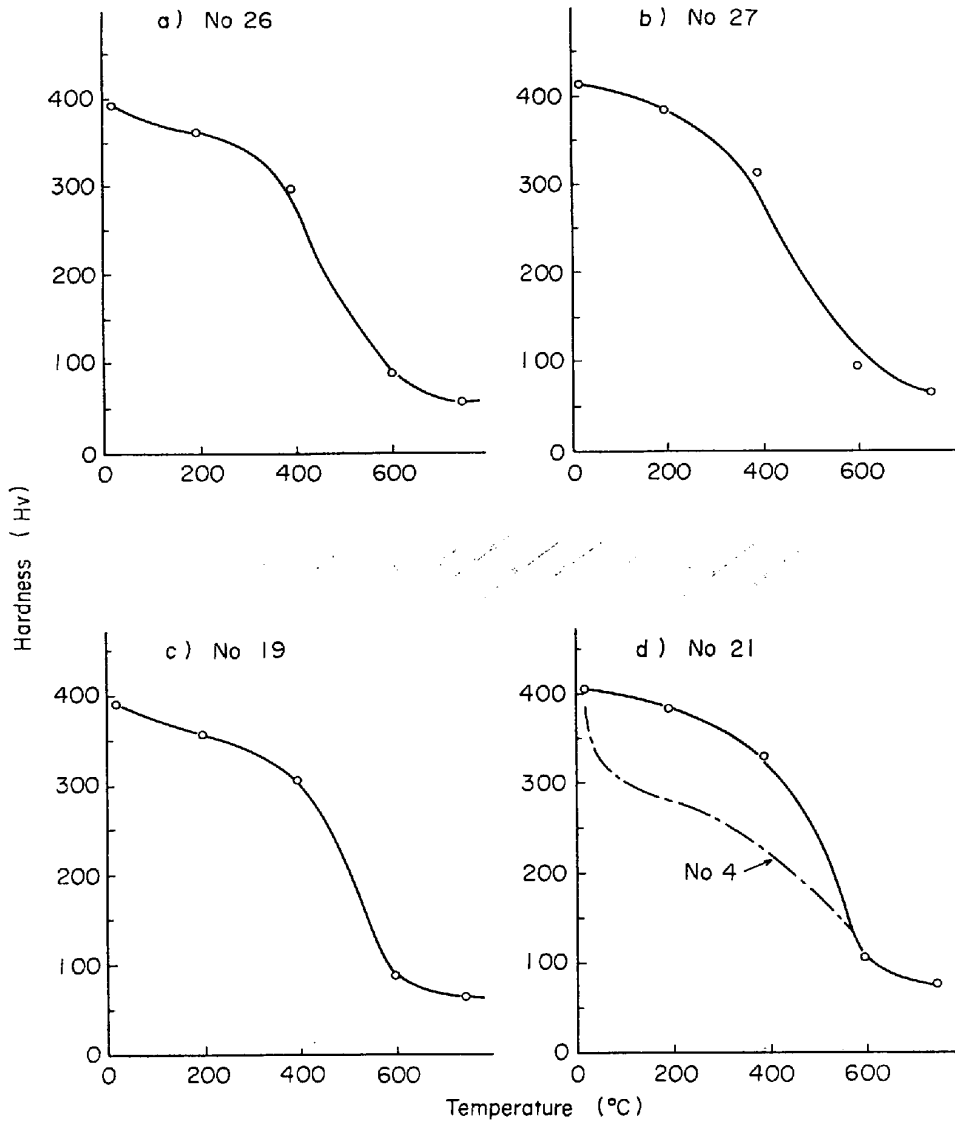


Fig. 17. Effect of temperature on hardness of typical specimens.

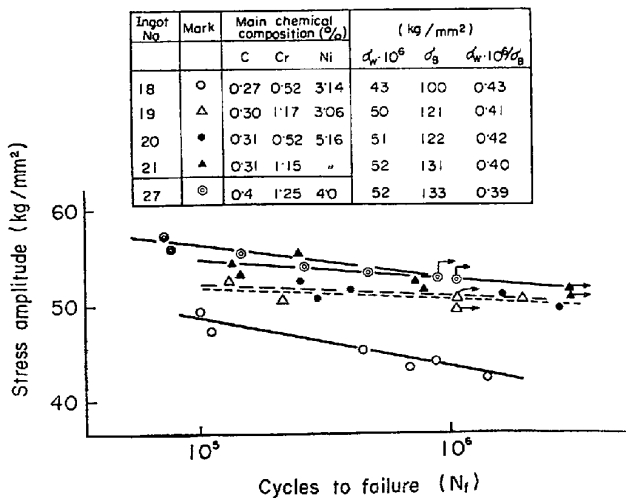


Fig. 18-1. Results of fatigue test under rotating bending stress at 100°C (specimen No 18~21 and 27) using the Crause type machine.

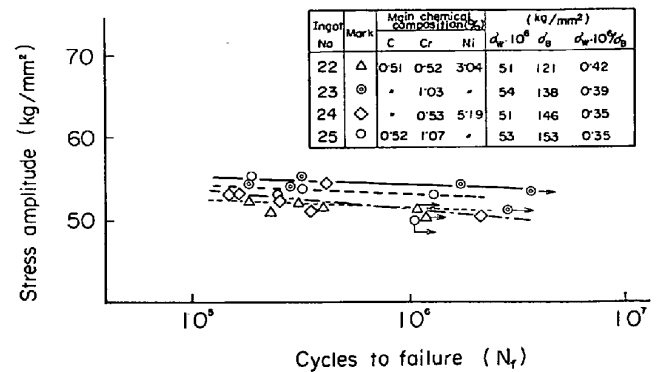


Fig. 18-2. Result of fatigue test under rotating bending stress at 100°C (specimen No 22-25) using the Crause type machine.

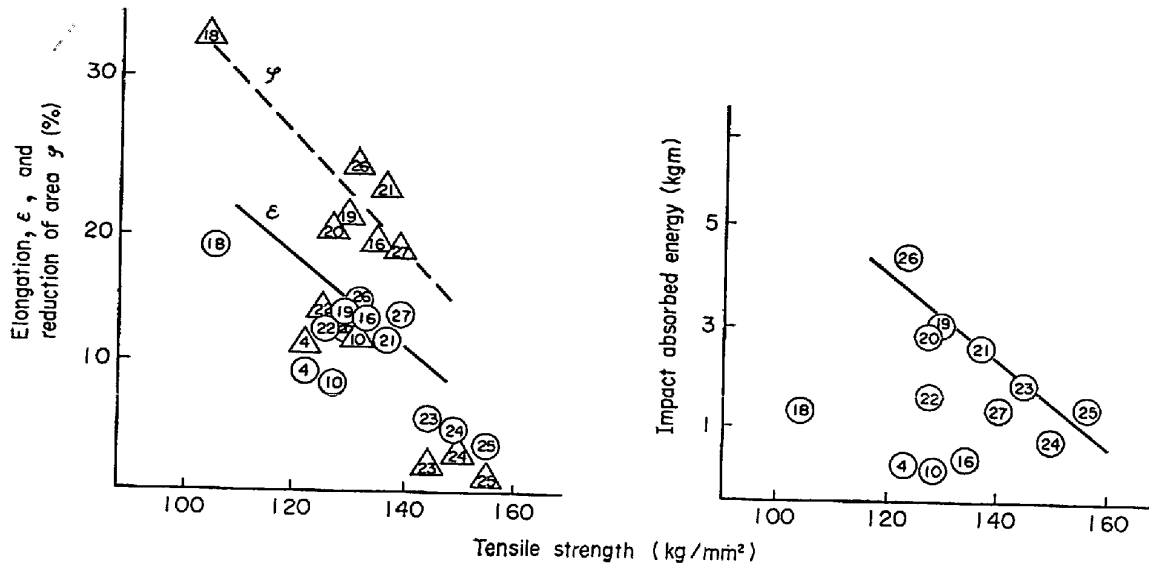


Fig. 19. Relation between elongation, reduction of area, impact absorbed energy and tensile strength at 20°C.

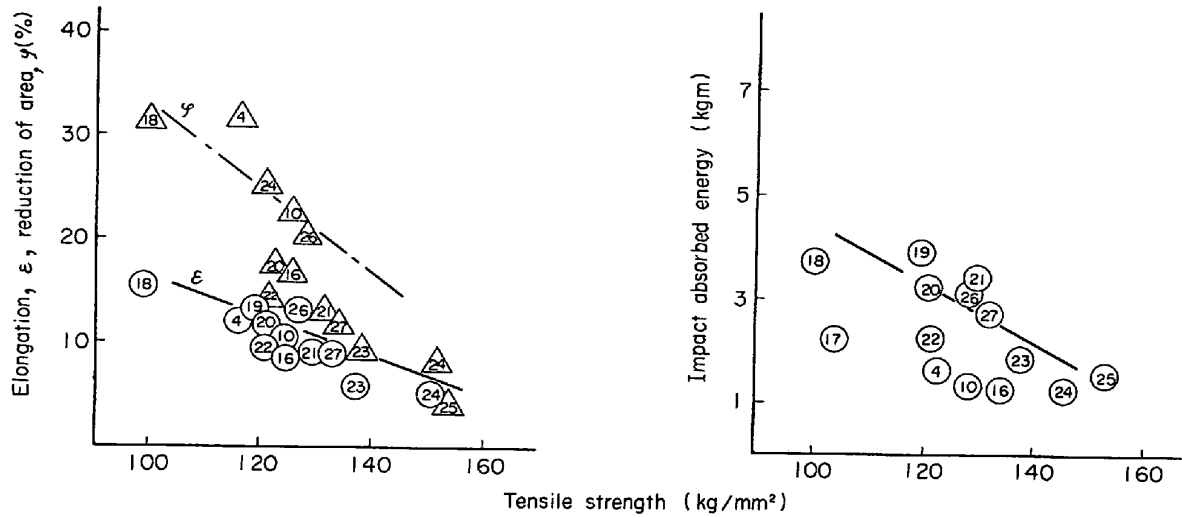


Fig. 20. Relations between elongation, reduction of area, impact absorbed energy and tensile strength at 100°C.

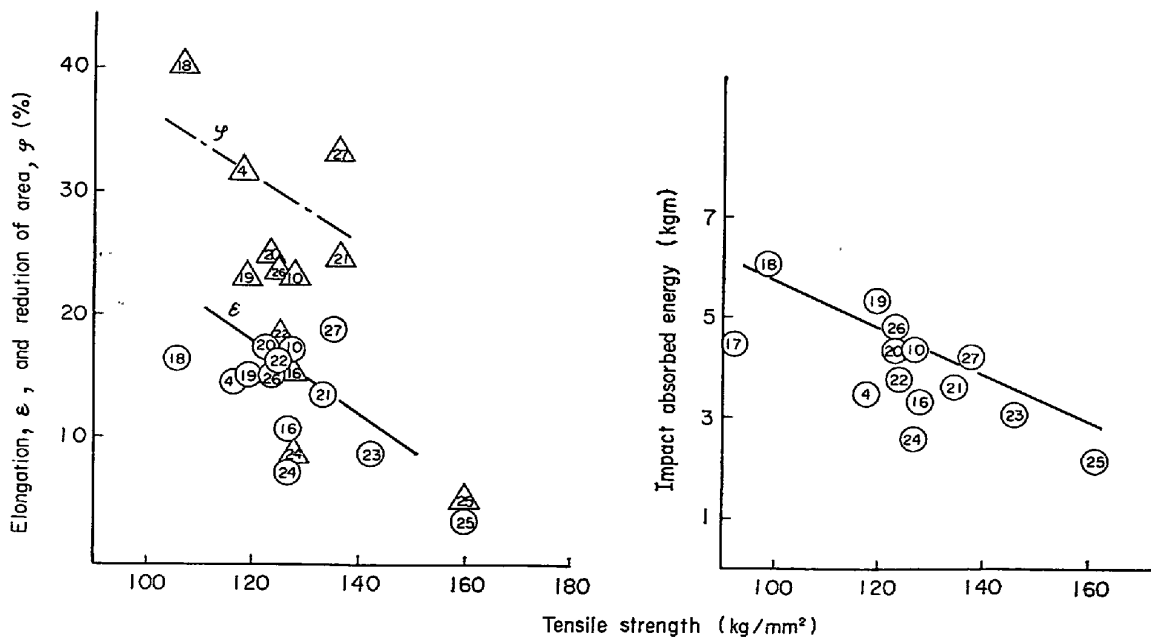


Fig. 21. Relation between elongation, reduction of area, impact absorbed energy and tensile strength at 200°C.

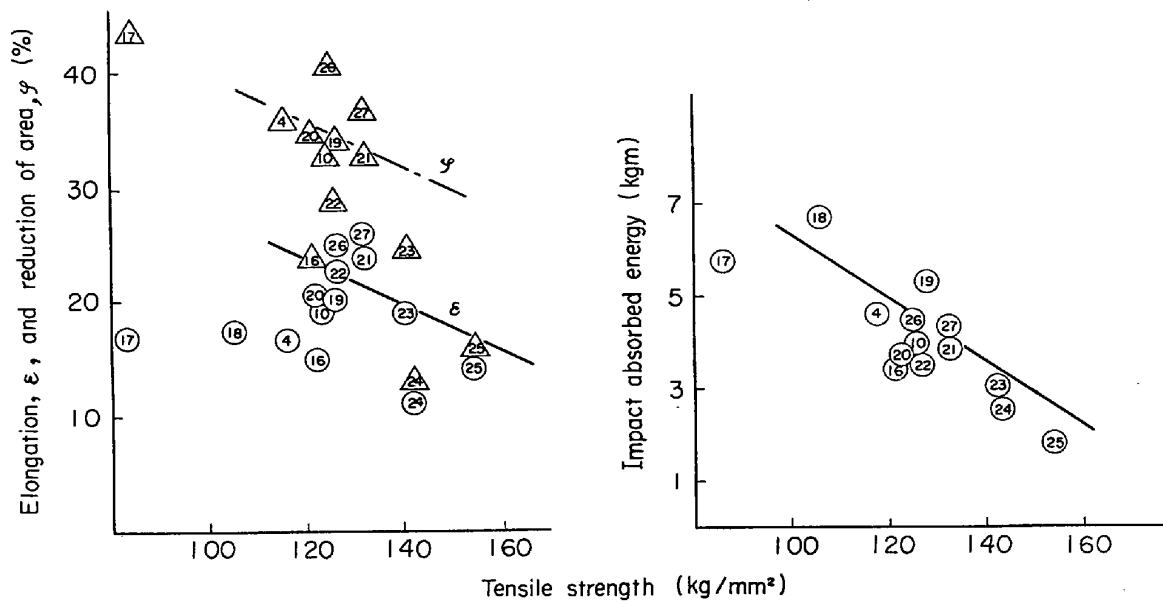


Fig. 22. Relation between elongation, reduction of area, impact absorbed energy and tensile strength at 300°C.

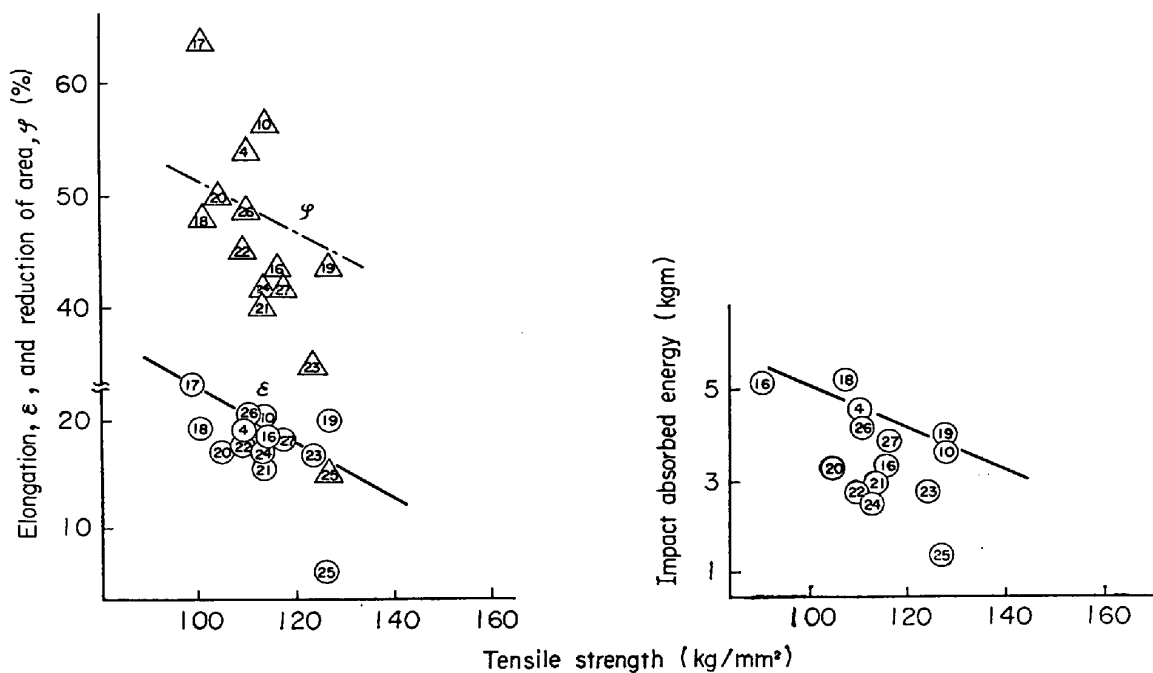


Fig. 23. Relation between elongation, reduction of area, impact absorbed energy and tensile strength at 400°C.

分散分析を行なった結果、有意と判定された試験温度と主効果および相互作用をまとめて Table 7 に示す。同表欄外に示すとく ◎, ○, △ 印は向上効果, (—), (—), — は劣化効果の大小なるものを表わす。++, + 印はそれぞれ 99%, 95% の信頼度で有意であることを意味し, ○, ○ 印は注目すべき主効果および相互作用を示す。

分散分析によつて明らかになつた各種成分効果を列記すると次のとおりである。

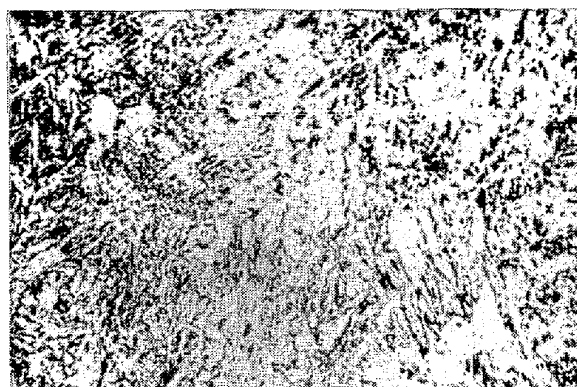
C: 強さを増すが、伸び、絞り、衝撃エネルギーを低くする。

Ni: 単独では強靱性の改善に効果が少ない。

Cr: 300°C で伸び、絞りの改善に効果があるが、他の温度では見られない。



a) No 18 Hv 326



b)



c) No 19 Hv 374

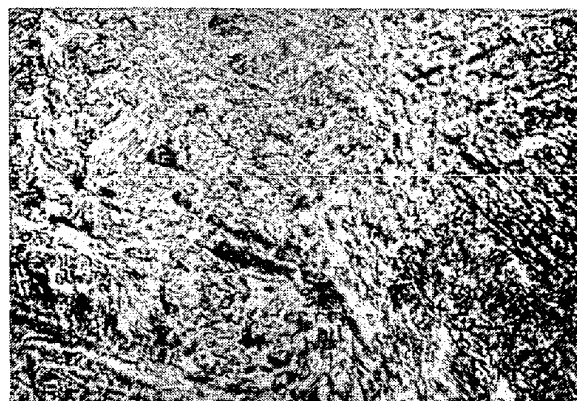


d)



e) No 20 Hv 389

×100



f)

×500 (3/4)

Photo. 3-1. Microstructures of cast steels after D and G heat treatments (Specimen No 18-20).

Ni×Cr : 100°C 以下で引張強さを高め, その割には伸び, 絞りを低減させない.

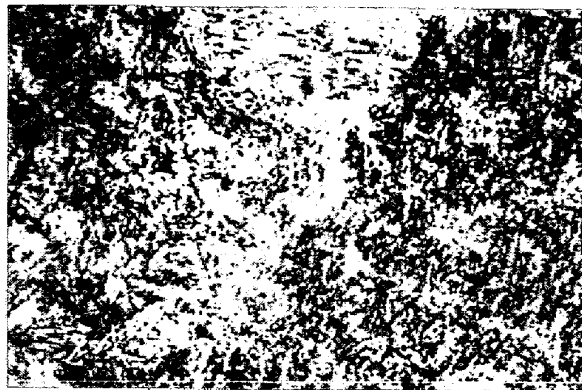
Ni×C : 強さを増し, 伸び絞りを低下させる.

3.2.4 考 察

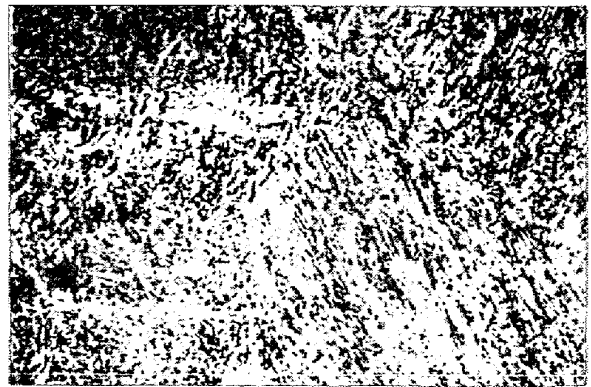
Ni-Cr 系鑄鋼の組織はフェライト, パーライト, マルテンサイトで, 靱性を付与するには, フェライト, パーライト組織にし, C量を調整して両者の割合を適当にするとともに, フェライトは, 初析フェライトの形としてではなく, 焼戻しまたは, セメントタイトの球状化処理の過程で粒状化させて, パーライト粒と混合させ, 均一分

散型にするのが好ましい. 靱性, 強さを決定的に支配するC量は, 著者らの別の実験によると0.32~0.2% Cが伸び絞りを重視するか, 強さを重視するかの境界である.

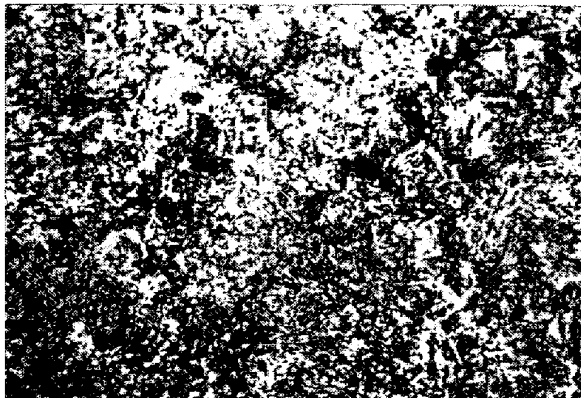
一方疲れ強さ, 10^6 回破断強さは, 引張強さと密接な関係があるので疲れ強さを重視する場合には少なくとも0.3% のCは必要である. Fig. 24 に実体ロールおよび本研究で取扱った鑄鋼 (20 kg 鋼塊) について行なつた回転曲げ疲れ試験における S-N 線図を示す. 同図と Fig. 14 から明らかなごとく, Ni が 1~5% 添加さ



g) No 21 Hv407



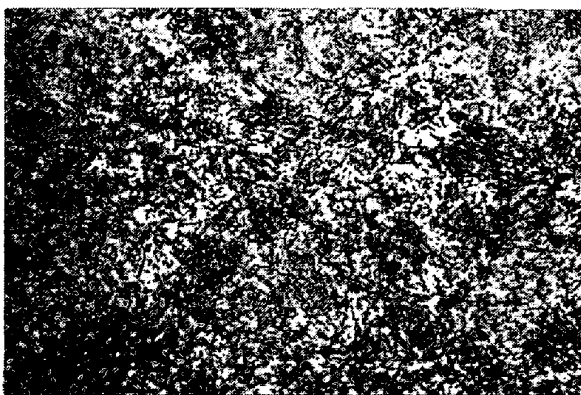
h)



i) No 22 Hv 376

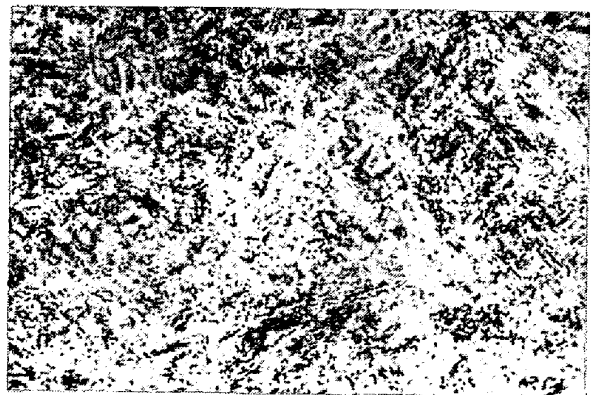


j)



k) No 23 Hv 433

×100



l)

×500 (3/4)

Photo. 3-2. Microstructures of cast steels after D and G heat treatments (Specimen No 21-23).

れた場合と添加されていない場合とでは、引張強さの増加分 $\Delta\sigma_B$ に対する疲れ強さの増加分 $\Delta\sigma_w$ が異なり、Ni が多い鋼種ほど $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_B$ すなわち疲れ限度比 (10⁶ 回) が小さい。また No 21, No 27 および No 16 が疲れ強さが優れている。Cr, Ni などの元素は、等温変態曲線を長時間側に移行させるので、 A_3 点以上からの冷却で、マルテンサイトが残りやすい。Cr, Ni の多いものが、疲れ強さが引張強さから期待されるほど大きくなく、また Ni 添加量の割りに伸び伸びが大きくならない。

これは マルテンサイトの 存在 によるものと 考えられる。

Cr は炭化物形成元素で、0.5%Cr より 1.25%Cr の方が強靱性の点で優れており、このことから、Cr 系炭化物は、強靱性、疲れ強さに対し効果的に作用していると考えられる。

Fig. 25 に引張強さと疲れ強さとの関係を示す。高 Ni 系鋼と低 Ni 系鋼は 1 つの直線では表わせない。この曲線を仮に 2 つの直線に分けて、それぞれ実験式で表わすと次のようになる。

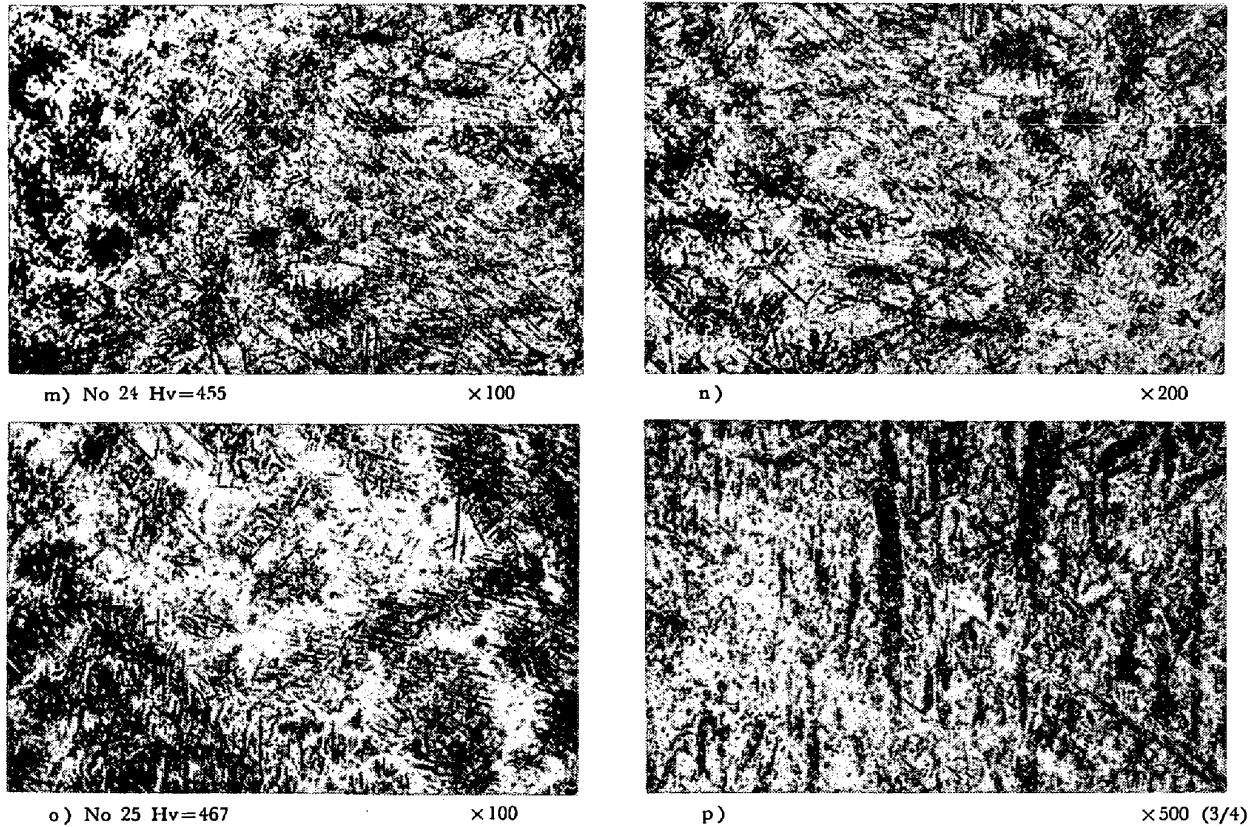


Photo. 3-3. Microstructures of cast steels after D and G heat treatments (Specimen No 24-25).

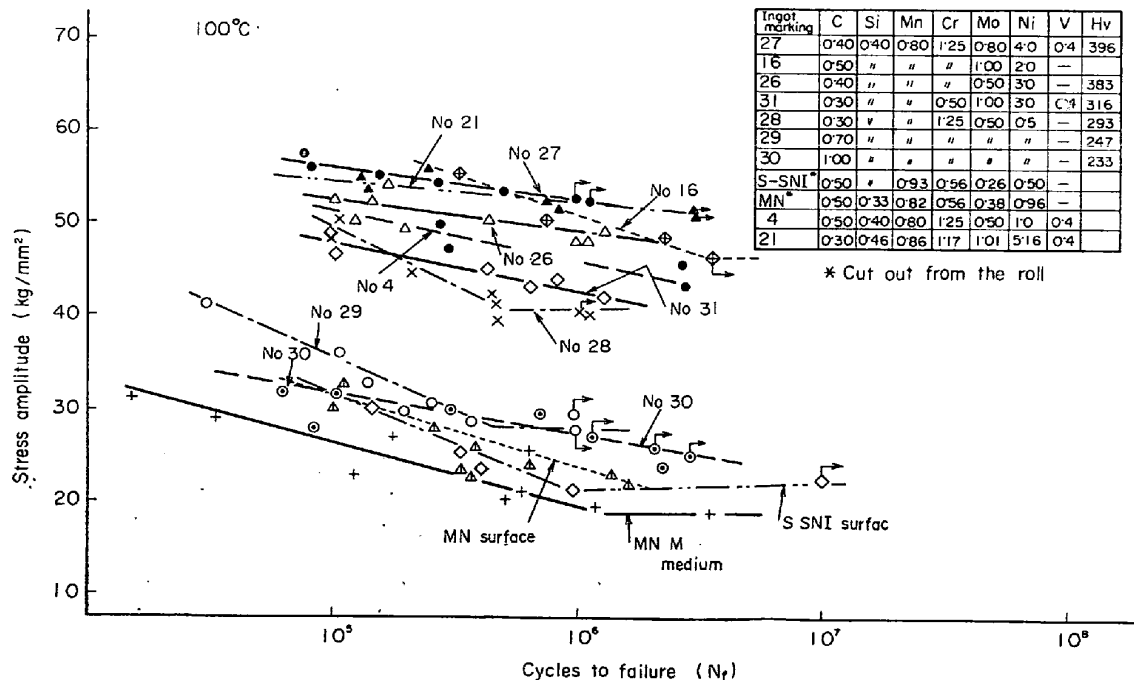


Fig. 24. Results of fatigue test under rotating bending stress of alloying cast steels.

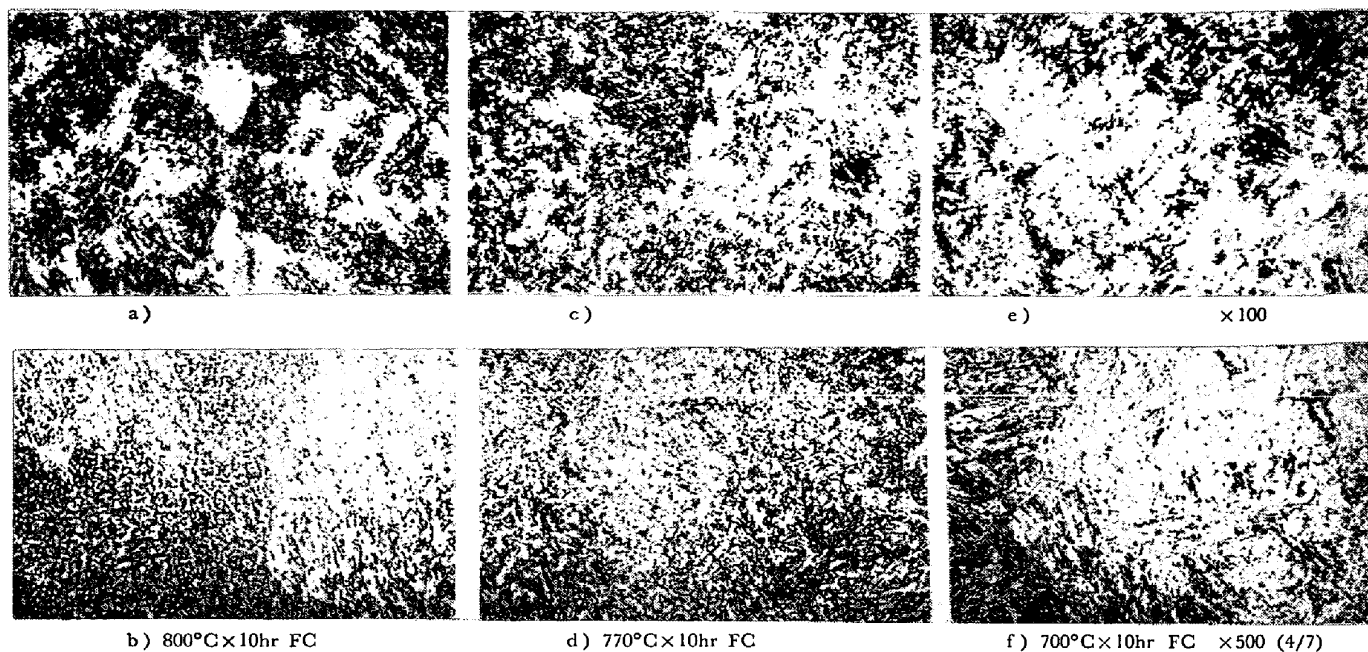
 高 Ni 鋳鋼 $\sigma_{w,10^6} = 0.13\sigma_B + 33$ ($\sigma_B > 100$ kg/mm²)

..... (1)

 低 Ni 鋳鋼 $\sigma_{w,10^6} = 1.1\sigma_B - 65$ ($\sigma_B < 100$ kg/mm²)

..... (2)

Photo. 5 は No 21 の DGAT 処理後の組織で、合金元素の高い鋳鋼を、オーステナイト化温度 1000°C で処

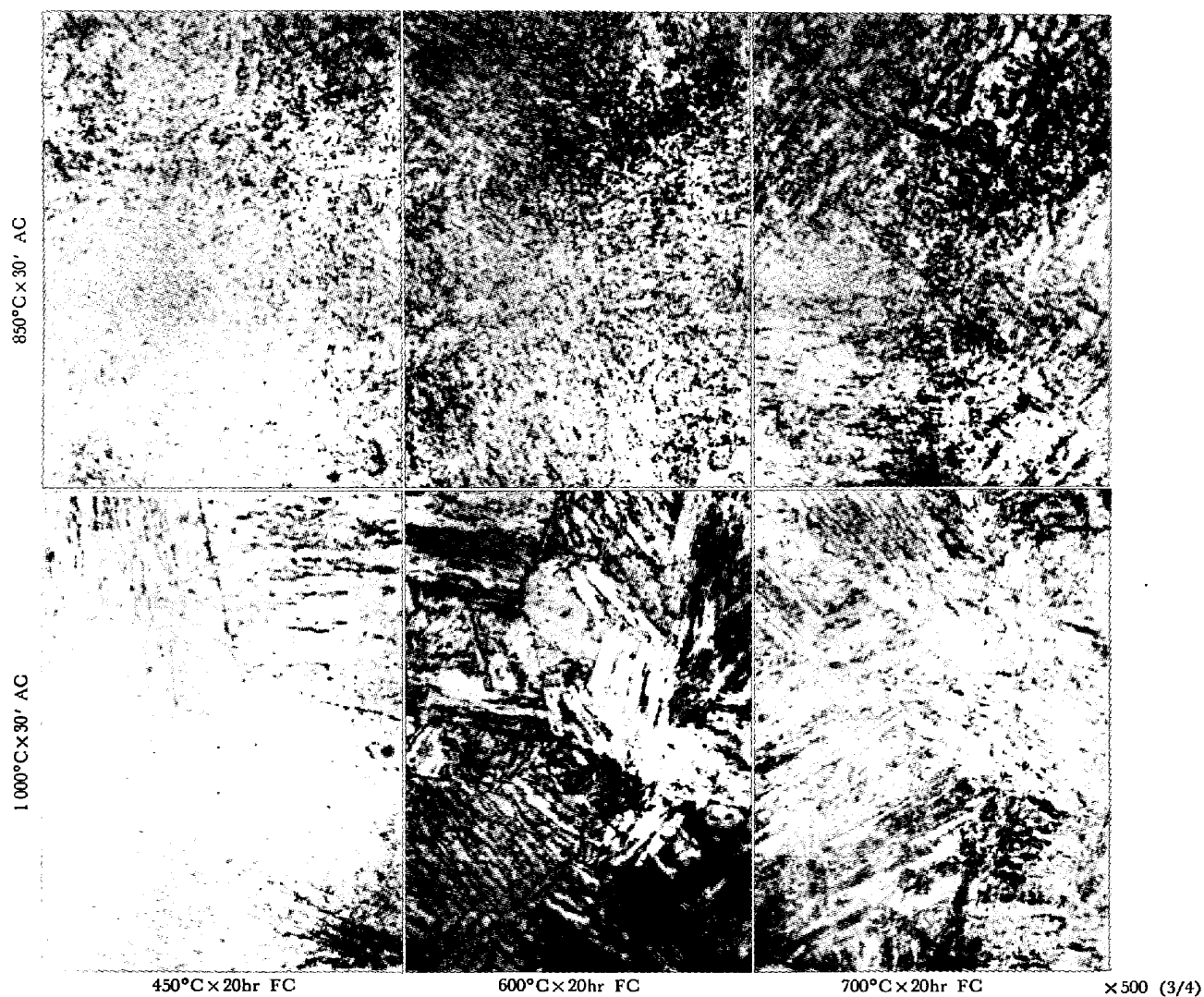


b) 800°C×10hr FC

d) 770°C×10hr FC

f) 700°C×10hr FC ×500 (4/7)

Photo. 4. Effect of globulizing temperatures on the microstructures (Specimen No 21).



450°C×20hr FC

600°C×20hr FC

700°C×20hr FC

×500 (3/4)

Photo. 5. Effect of austenitizing and tempering temperatures (T) on the microstructure (Specimen No 21).

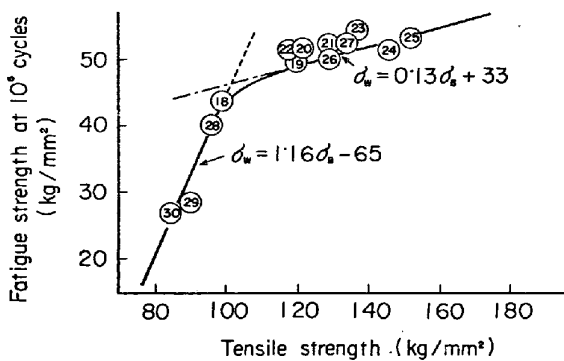


Fig. 25. Relation between tensile strength and fatigue strength at 100°C.

理したものは、850°Cで処理したものより、結晶粒が大きくなり、組織が粗くなる。一方炭化物の分布や量もオーステナイト化温度で変わってくる。したがって、成分系だけでなく熱処理効果も材質を考慮する上で重要であるが、今後十分検討する必要があると考えられる。

3.2.5 小結言

V, C および Ni と Cr の交互作用が伸び、絞りに効果的な成分であると考え、強靱性の優れた鋳鋼を得るために特に C と Ni と Cr との組合わせについて調べ、次の点を明らかにした。

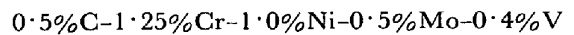
- (i) 0.4%C-1.25%Cr-3.0%Ni-0.5%Mo-0.4%V
0.4%C-1.25%Cr-4.0%Ni-0.5%Mo-0.4%V
鋳鋼は疲れ強さが高く、疲れ限度比が小さくかつ強靱性が優れている。
- (ii) Ni を 2.0% から 5.0% に高くしても、伸び、絞り、衝撃値は大きくならないが引張強さ、疲れ強さが大きくなる。($\Delta\sigma_{\infty 10^7} = 5 \sim 15 \text{ kg/mm}^2$, $\Delta\sigma_B = 20 \sim 40 \text{ kg/mm}^2$)
- (iii) Ni と Cr の交互作用は、100°C 以下で引張強さを高めその割には伸び絞りを低減させない。

4. 結 論

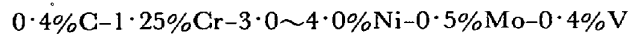
ロール用強靱型鋳鋼に及ぼす合金元素の影響を調査した結果下記の結論が得られた。

- 1) Ni-Cr 系鋳鋼の疲れ強さ、強靱性に及ぼす各種元素の影響を調べ、優れた成分系を検討したところ、現在

使用されている SNI 鋳鋼の改良型としては



鋳鋼が考えられた。またさらに強い疲れ強さと強靱性が必要な場合には



にすると良いことを確認した。

- 2) 本研究によつて発明した 0.5C-1.0Ni-1.25Cr-0.5Mo-0.4V 鋳鋼 (特殊 SNI) は、従来の 0.5C-0.5Ni-0.5Cr-0.5Mo 鋳鋼 (SNI) に比べ V を 0.4% 添加したことが、Cr を 0.5 から 1.25% に Ni を 0.5% から 1.0% に増したことが、成分的な違いである。

- 3) V はとくに高温中温における伸び絞りを増すのに有効な元素であり、この点は Ni, Cr, Mo には見られない特異性と考えられた。Cr は Ni との交互作用によつて強靱性に寄与していると考えられた。また 0.3%Nb 添加は強靱性の改善に有害であつた。

- 4) 機械的性質は組織と密接な関係があり、初析フェライトを球状化(G)処理およびオーステナイト化(A)処理で消滅させフェライトを粒状化し均一に分散させること、マルテンサイトを焼もどし(T)処理で焼もどしマルテンサイトにする、パーライト中の層状セメンタイトも球状化(G)処理で粒状にし緻密な組織にすることなどが疲れ強さ、強靱性の改善に必要である。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、御指導をいただいた。東北大学名誉教授 門間改三博士 東北大学教授 須藤一博士に感謝いたします。

文 献

- 1) H. G. GROVER, S. A. GORDON, and L. R. JACKSON: The fatigue of metal and structure, (1960), p. 122
- 2) C. F. FELTNER and G. M. SINCLAIR: Joint int. conf. on Creep, (1963), p. 3
- 3) D. S. WOOD: Welding J., 45 (1966), 90S
- 4) M. E. HULMBERG: Trans. ASME, 73 (1951), p. 733
- 5) 鈴木, 西, 斎藤, 小平: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 266
- 6) 鈴木, 高橋, 西, 小平, 堀: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 371