

- | | |
|--|--|
| 5) 4) に同じ p. 9 | (1941) 166 |
| 6) J. H. Dewey & T. N. Armstrong: E & Mining J. No. 7 (1950) 64 | 2. H. J. Gough: The fatigue of metals (1926) 152 |
| 7) 高岡三郎: 鑛協採鑛資料 10 (昭 25, 7) 8 | 12) 新持喜一郎: 鐵と鋼, 第 35 年第 11 號 29 頁 (昭 24) |
| 8) 4) に同じ p. 7 | |
| 9) 筆者: 本會第 39 回講演會發表 | 13) 河井泰治, 小川楠雄: 鐵と鋼, 第 37 年第 3 號 14 頁 (昭 26) |
| 10) G. A. Hankins & H. R. Mills: J. of Iron and Steel Inst. Vol 131 (1935) 165 | 14) 11) の 1. に同じ |
| 11) 例えば 1. Handbuck der Werkstoffprüfung | |

ガスタービン翼用耐熱鋼に関する研究 (I)

(耐熱鋼の研究 VIII)

(昭和 26 年 4 月本會講演大會にて講演)

出口喜勇爾*

STUDY ON HEAT-RESISTING STEELS FOR GAS TURBINE BLADES. (I)

Kiyoji Deguchi

Synopsis of Reports I & II:

The following heat-resisting steels for gas turbine blades were made and several properties were studied:

(i) High C-Cr-Ni austenitic steel (C 0.5, Cr 15, Ni 20, W 3, Mo 3) (ii) Tinidur of Krupp (C 0.1, Cr 15, Ni 30, Ti 2) (iii) High Cr-Ni-V steel (C 0.3, Cr 19, Ni 9, W 1.2, Mo 1.3, V 1, (N 0.15)) (iv) Timken 16-25-6 type (C 0.1, Cr 16, Ni 25, Mo 6, (N 0.15)) (v) LCN-155 (C 0.1, Cr 20, Ni 25, W 2, Mo 3, Co 20, (N 0.15)) (vi) WH42B (Cr 18, Ni 45, Co 25, Ti 2).

Also influences of about 0.15% nitrogen added in the samples (iii)-(v) by using nitrogenized ferro-Cr were tested.

(a) These samples were generally difficult to forge, especially in (v) & (vi). The difficulty was, however, overcome after several trials in melting and forging processes, and success obtained in making the test piece. (b) At first the hardness and microstructure of specimens were studied, with samples heated at 1000-1200°C for 30min-10 hr, and tempered at 600-900°C for 30min-10 hr after quenched at 1100-1200°C. (c) Next the tension and impact tests at high temperatures up to 800°C were made, with specimens quenched from 1100°C and tempered at 800°C.

And also, the high temperature creep tests at 600 and 725°C were made. (d) From these results obtained, WH42B and N-added LCN-155 seem to be the most suitable for gas turbine blades among these samples studied, and non-N LCN-155 or N-added Timken 16-25-6 type was also recommended. For this purpose, besides, there was N-added high Cr-Ni-V steel, being of considerably inferior quality. Problems in practice were the scarcity of Ni & Co, the trouble in.

* 日本特殊鋼株式會社

N-adding procedure and the difficulties in ingot forging. If, however, the series of the authors 301 (C 0.4, Cr 14, Ni 15, W 3) was used for this purpose, could not expect a higher thermal efficiency in gas turbines.

I. 緒 言

戦後紹介された欧米の文献¹⁾によれば、かの地に於けるガスタービン翼用耐熱材料はその研究並に実用の両面に於て誠に驚嘆すべき進歩を遂げている。然し我々が早速その様な高級耐熱材料のガスタービン翼を試作しようとしても現在の我々の技術水準、原料問題並に生産設備を以てしては蓋し遠く及ばない所であつて、この様な試作どころではなくこれら耐熱材料を研究しようとしても単にタンマン爐等で少量の試料を溶解して硬度、組織の變化等を検討するのみならば別であるが、その高温機械的諸性質を研究せんとする時は、先ず溶解した鋼塊を試験棒に鍛伸する事が一般に甚だ困難なものが多く、従つてこれは容易ではない。筆者はこれらの材料で以て實際にガスタービン翼の試作きへも出来る様に十分技術的に鍛造の困難を克服する事を目的として研究を進め、本邦では始めてかゝる高級耐熱鋼の高温機械的諸性質等を出来るだけ詳細に研究した。

II. 試 料

研究した鋼種は、

- (i) 高CのCr-Ni オーステナイト鋼
- (ii) Krupp の Tinidur
- (iii) 高Cr-Ni-V 鋼
- (iv) Timken の 16-25-6 型
- (v) LCN-155
- (vi) WH 42 B

である。(i) は筆者が戦前及戦時中に行つた研究²⁾により、鍛造にそれ程困難を伴はずして然も耐熱性の最も良好と結論されたものであつて、これから段々と高級材料に及んだのである。

これらの中特に (iii)~(v) に對しては 0.15~0.20% 添加したNの影響を詳細に検討した。

試料は研究用高周波電気爐によつて主として 8kg 鋼塊を熔製した。主たる試料の化學成分を第1表に示す。LCN-155 には通常 Cb を約 1.0% 添加するのであるが、これは入手出来なかつたので省略した。

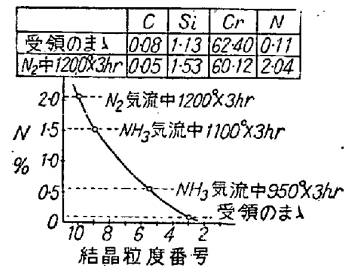
III. 研究 方 法

試料の鍛延性に關しては主として顯微鏡組織等の考察

によつた。鍛伸した試験棒は先ず溶體化處理及時効處理後の硬度、組織の變化を調査した後、800°C迄の各温度に於て高温抗張、衝撃試験を行い、更に代表的試料に就いては高温匍匐試験を行つた。これらの結果により我國では現在工業的にどの程度の耐熱材料を以て實際のガスタービン翼が製造出来るかに關して考察した。

IV. 耐熱鋼に對する N の添加

前述の如く高Cr-Ni-V, Timken 16-25-6 型, LCN-155 ではNを添加したものとしないものとに就き試験したが、このNの添加には窒化した Ferro-Cr をNの母合金として使用した。今、大約 5mm 以下に粉碎した Ferro-Cr を各種條件で窒化後一旦熔融し滲入したNを均等ならしめた後、その含有N%を真空熔融法によつて測定した結果を第1圖に示す。即ち受領状態の Ferro-



第 1 圖

Cr は特に窒化しなくともNを約 0.1% 含むが、N₂ 氣流中 (1200°CになるとNH₃が分解するので窒素ポンペよりN₂を流して試験した) で1200°C×3hr程度加熱すると約 2% ものNを含有する。本實驗では N₂ 氣流中 1100~1200°C×3hr 窒化したものを用いた。尙これら窒化した Ferr-Cr の凝固組織を検討すると炭化物共晶が結晶粒界を形成して居り、同圖に示した様に、N含量が多い程結晶粒が微細化している、蓋し窒化物の微粒が増加する爲と考えられる。

V. 試 料 の 鍛 伸

これらの鋼種は前述の如く試験片に鍛伸する事が一般に甚だ困難なものが多い。勿論その困難なのは鋼塊の粗延に於てである。扱て筆者は製品の鍛造の場合に近からしめる爲に加熱には玉場の石炭加熱爐を使用し、1/4 又は 1/10t 氣鎚によつて各種條件の下に鍛造試験を行つた。

先ず結論的に各鋼種の鍛伸の難易を比較すれば、高

第1表 主なる試料の化学成分

鋼種	チャージ 番 號	化 學 成									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni			
(i) 高 C-Cr-Ni オーステナイト鋼	3838	0.50	1.55	0.94	0.025	0.023	11.58	17.00			
	3841	0.50	1.64	0.99	0.023	0.020	12.81	17.24			
	4175	0.50	1.50	1.47	0.024	0.020	15.14	20.01			
(ii) Krupp の Tinidur	3883	0.15	0.81	0.89	0.020	0.014	16.77	33.95			
	4014	0.14	0.98	0.41	0.023	0.003	15.10	30.16			
(iii) 高 Cr- Ni-V 鋼	N 添加 せ ず	3964	0.31	0.37	0.71	0.035	0.009	20.81	11.79		
		4120	0.31	0.72	0.76	0.014	0.015	19.77	8.89		
	N 添加	4023	0.31	0.70	0.78	0.027	0.012	19.95	10.14		
		4093	0.30	0.40	0.66	0.029	0.015	19.86	9.16		
(iv) Timken 16-25-6 型	N 添加 せ ず	3842	0.17	0.85	1.12	0.019	0.024	18.52	25.02		
		3877	0.13	0.74	1.21	0.017	0.016	18.20	25.78		
		3843	0.23	0.86	1.21	0.023	0.034	18.25	25.60		
		3926	0.15	0.79	1.26	0.025	0.010	16.48	25.60		
		4111	0.10	0.60	1.14	0.024	0.017	17.03	24.67		
		4179	0.10	0.53	1.06	0.013	0.019	16.65	24.96		
	N 添加	4176	0.18	0.62	0.98	0.015	0.038	16.38	25.15		
		4178	0.18	0.52	1.06	0.19	0.026	25.20	24.50		
		4201	0.10	0.50	1.06	0.017	0.011	35.71	24.61		
		4022	0.18	0.69	1.18	0.023	0.009	16.84	26.00		
		4092	0.16	0.57	1.07	0.026	0.020	16.56	24.84		
		(v) LCN-155	N 添加 せ ず	3920	0.17	0.38	1.22	0.039	0.007	9.95	25.73
				3882	0.10	0.36	0.91	0.022	0.012	10.71	24.05
				3962	0.08	0.53	0.46	0.026	0.008	10.07	25.17
4013	0.12			0.45	0.75	0.018	0.004	10.09	24.70		
4057	0.11			0.47	0.57	0.026	0.014	10.35	25.63		
3963	0.18			0.83	0.37	0.021	0.017	20.39	24.90		
N 添加	4112	0.11	0.39	0.73	0.038	0.019	20.51	24.93			
	4091	0.10	0.45	0.82	0.030	0.018	20.57	23.70			
	4097	0.10	0.51	0.80	0.030	0.018	20.57	24.13			
	4021	0.14	0.48	0.76	0.028	0.010	21.17	22.90			
(vi) WH 42 B		4131	0.11	0.42	0.76	0.031	0.017	21.02	24.15		
		3707	0.03	0.78	0.58	0.020	0.013	16.65	45.97		
		3710	0.02	0.80	0.60	0.007	0.006	16.07	46.41		
		3783	0.03	0.50	0.86	0.004	0.004	20.40	43.60		
		4128	0.03	1.15	0.49	0.008	0.006	19.73	45.23		
		4152	0.03	1.36	0.49	0.006	0.013	18.79	45.62		
		4079	0.09	1.26	0.52	0.008	0.020	19.05	43.38		
		4151	0.02	1.11	0.50	0.008	0.011	19.59	44.28		
		4113	0.02	1.04	0.50	0.009	0.014	19.76	42.93		
		4129	0.09	1.09	0.51	0.010	0.009	18.23	42.74		
4147	0.06	1.33	0.47	0.011	0.013	19.23	44.85				

Cr-Ni-V, Timken 16-25-6 型, Tinidur, LCN-155, WH43B の順に困難となる。又 N を添加したものは、しないものよりも困難である。かゝる鍛造試験の詳細は省略し、その二三に就いてのみ述べれば

(1) 従来 Ti を相当含有している耐熱鋼は鍛伸が中々困難であつたが、Tinidur もその例に漏れず、鍛造温度が低目の時は殆ど伸びず、少しく高い時は全面に割れ

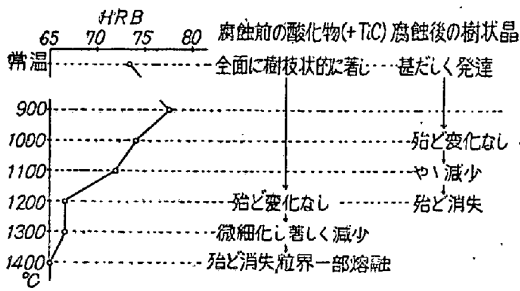
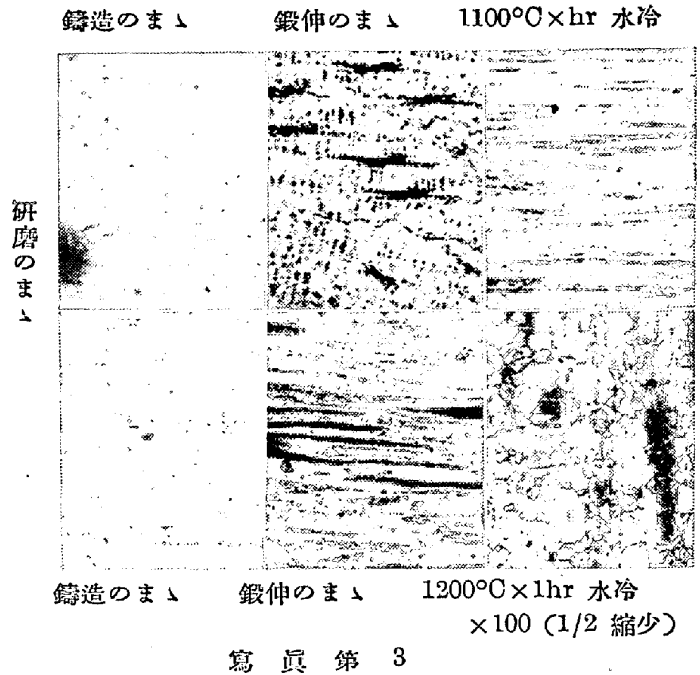
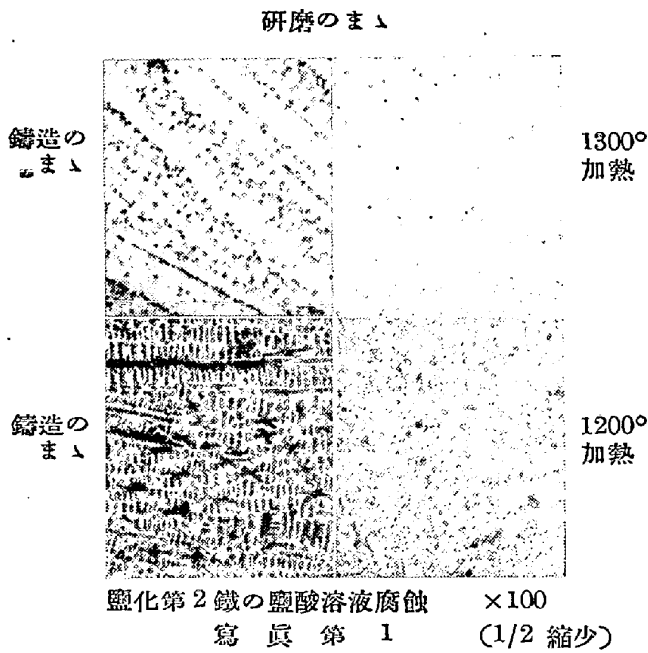
を生じた。そこで熔製(アームコ鉄、木炭銑、上 Ferro-Cr, 電解 Ni, Ferro-Ti 使用)したまゝの鋼塊より顕微鏡試料を切り出し 1400°C 迄の各温度に 10~30min 加熱し、研磨したまゝ及鹽化第 2 鐵の鹽酸溶液で腐蝕した組織を調べた。寫眞第 1 はこれを示す。更に硬度の變化をも併せて圖示すれば第 2 圖の如くなる。これによれば鑄造状態に於て、腐蝕前に全面に著しく樹枝状に表わ

分 (%)					ガス量 (%)		備 考
W	Mo	V	Ti	Co	O	N	
2.00 2.36 2.70	3.08 3.11 2.55	— — —	— 0.03 —	— — —			高温抗張, 衝撃
— —	— —	— —	0.75 1.26	— —	0.0128 0.0045	0.0035 0.0063	鍛造試験 高温抗張, 衝撃
0.71 0.72	1.33 1.41	0.89 0.76	— —	— —	0.0023 0.0076	0.0285 0.0056	高温抗張, 衝撃 高温匍匐
1.16 1.27	1.38 1.35	0.90 0.76	— —	— —		0.19 0.23	高温抗張, 衝撃 高温匍匐
— — — — —	5.57 6.19 5.50 6.33 6.20	— — — — —	— — — — —	— — — — —	0.0199 0.0225 0.0154 0.0134 0.0163	0.0306 0.0395 0.0256 0.0271 0.0561	鍛造試験 高温抗張, 衝撃 高温匍匐
— — —	5.76 5.64 5.45	— — —	— — —	— — —			組織, 衝撃
— —	5.73 6.03	— —	— —	— —		0.16 0.20	高温抗張, 衝撃 高温匍匐
— — 2.83 2.96 2.67 3.07 2.28	— — 3.31 3.33 2.79 2.90 2.71	— — — — — — —	— — — — — — —	17.80 24.40 21.50 19.70 19.50 21.90 20.07	0.0079 0.0244 0.0082 0.0081 0.0114 0.0102 0.0107	0.0236 0.0084 0.0267 0.0145 0.0075 0.0343 0.0104	鍛造試験 高温, 抗張, 衝撃 鍛造試験 高温, 抗張, 衝撃 高温匍匐
2.55 2.45 3.07 2.81	2.93 3.32 3.09 3.25	— — — —	— — — —	20.56 21.17 20.88 17.69		0.21 0.22 0.17 0.14	熔解試験 高温抗張, 衝撃 高温匍匐
— — — — — — — — —	— — — — — — — — —	tr 2.37 tr — — — — — —	0.06 — 0.01 1.94 1.44 1.82 1.73 1.87 1.99 1.60	23.57 23.50 27.13 23.79 24.67 25.16 24.08 22.93 24.01 24.74	0.0265 — 0.0128 0.0075 0.0074 0.0057 0.0075 0.0090 0.0080 0.0068	0.0090 — 0.0229 0.0139 0.0069 0.0088 0.0095 0.0139 0.0085 0.0177	鍛造試験 高温抗張, 衝撃 高温匍匐

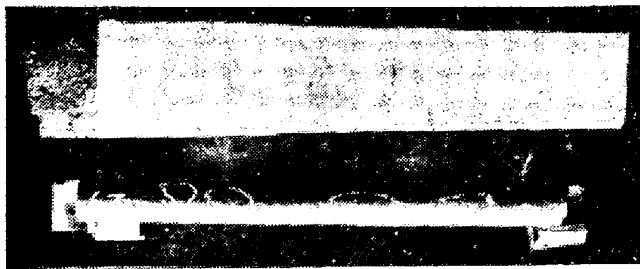
れている酸化物 (TiC も多いと思われる) の固溶状況, 腐蝕後の樹状晶の消失状況や硬度変化から推定すれば 1200~1300°C に加熱した方が鍛伸し易い様に考えられるが, この様な高温で鍛打すればどうしても割れてしまう。これによつて見れば, 鍛延を阻害する因子は単にその樹枝状晶のみでなく寧ろ基質そのものにあると考えられる。要するにこの際は 1000~1100°C に於て出来

るだけ軽き鍛打, 加熱を根氣よく繰返す事によつてのみ粗延し得た。

(2) LCN-155 は最初容易に試験棒を鍛伸する事が出来なかつたので, これよりも低合金のものから段々に鍛伸に習熟して行く様に努めた。尙鍛打の強弱による影響の一例を挙げれば, No. 3962, 3963 は同一原料にて熔解し鋼塊を同様に皮むき疵取りし鍛造温度も共に 1050°C



第 2 圖



であつたが、最初粗延する時に、前者は 1/4t 氣鎚を使用した所寫眞第 2 に示す如く全面に疵を發生した。よつてこれを十分 grind off してから 1/10t 氣鎚により鍛打、疵取を繰返したが後から後からと疵が發生して遂にこのチャージは廢却せざるを得なかつた、蓋し最初強く鍛打し過ぎた爲に芯部に迄 micro-crack を生じていた爲である。これに對し後者は鍛造比約 2 になる迄 1/10t 氣鎚を、それから 1/4t 氣鎚を使用し、疵の出た時はその都度 grind off して φ20mm に伸ばした。これを焼鈍酸洗して見ると所々に疵があるが深くはないので旋削して試験片に仕上げる事が出来た。

(3) N を添加した試料では鍛伸後研磨したままの組織を見ると窒化物等が鍛伸方向に點綴してあだかも「すだれ」の様に見えるものが多い。この中例えば LCN-155 (No. 4021) では寫眞第 3 に見る如く、茶褐色の太い層狀組織は鋳造状態に於てもやはり太く樹枝状に現われていたものである。最初これは特別な相かと考えたが、N が僅かに 0.17% 入つた爲にこれ程多量の異相が出現すると思われぬ。これを 1100°C に加熱する時は保持時間 1hr 程度では未だ殆どそのまま残存するが 10hr 程度保持すれば可成り消失し 1200°C に加熱する時は 30 min~1hr 程度でも大部分消失してしまう。これらを更に高倍率で檢鏡した結果等により、上記茶褐色の太い層狀組織は炭化物、窒化物が Colony 状をなして偏析しているのであつて、その後各鋼種を各種熱處理した場合の組織を詳細に檢鏡して見ると、N を添加しない場合でもかゝる組織を示している事がある。

又高 Cr-Ni-V 鋼や Timken 16-25-6 型では 0.2% 或はそれ以上の N を含有せしめても造塊に際し健全なる鋼塊を得るが、LCN-155 では Co を多量に含む爲に N の固溶飽和限度が低く、従つて N 約 0.2% 以上では注型に際し吹くか或は鋼塊の外観は異状がなくとも寫眞第 4 に示す如く内部に鑄集を生ずる。



寫眞第 4

(4) WH 42 B の鍛伸には最も苦心した所であつて、如何様にして熔解したならば最も伸び易い鋼塊を得るかを検討する爲に

(a) Cr の原料として上 Ferro-Cr 又は metallic Cr を使用

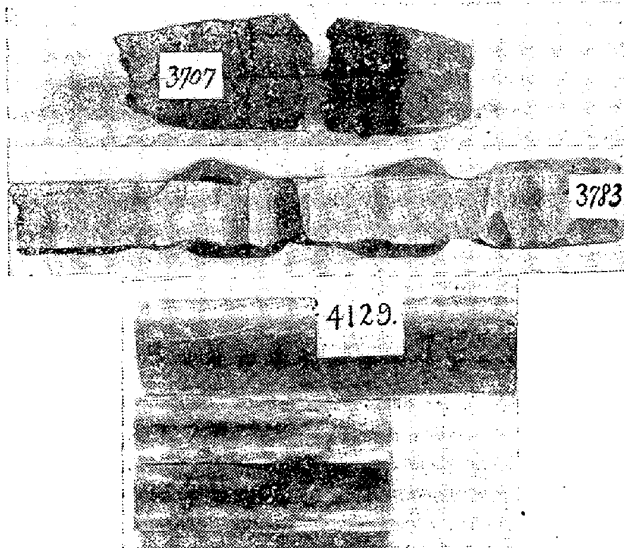
(b) Ni は電解又はモンドを使用

(c) 鋼滓は硝子の代りに石灰の鋼滓 (石灰 : 螢石 : 銀砂 = 7:1.5:1.5) を使用し、鋼滓と原料を layer by layer に坩堝中に装入

(d) 脱硫の爲に Ni-Mg 合金 (0.45%) を出鋼の際投入

(e) Ti の代りに V を使用

したものに對し鍛造条件を變へて試験した、かくして寫眞第 5 に示す如く最初は No. 3707 の様に全然伸びなかつたものが No. 3783 の様に疵は多いが若干伸びる様に



寫眞 第 5

なり、更に疵の殆どない健全なる試験棒を伸ばし得るに到つた。唯石灰の鋼滓は注型の際硝子の様には浮き難い爲に、折角鍛伸した試験棒が、寫眞に示す如く、鋼中に懸垂していた鋼滓の所からきれいに割れる (例へば No.

4129) 事もあつたので、更に試験を繼續して硝子の鋼滓を使用したものでも十分鍛伸し得るに到つた。

VI. 熱處理による硬度及組織の變化

先ず鍛伸した全試料に就き、1000~1200°C x 40min 焼入 (空冷) 600~900°C x 1hr 焼戻 (空冷) した場合の硬度及組織の變化を調べた。然し焼入及焼戻温度に保持する時間の影響即ち溶體化處理及時効處理の検討が必要高ある。これに關しては (iii) で Cr-Ni-V (iv) Timken 16-25-6 型 (v) LCN-155 に就き特に N の影響を詳述する事とし、他の鋼種では單に焼戻温度による硬度變化を第 3 圖に示すに止める。

(1) 第 4 圖は鍛伸した試験を 1000, 1100, 1200°C にそれぞれ 10hr 迄加熱した場合の硬度の變化を示す。これによれば、

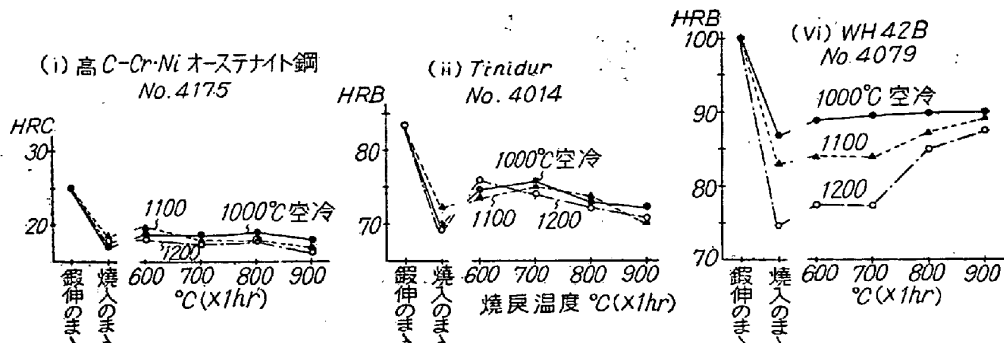
(a) 焼入温度に保持する事最初の 1~2hr 程度で硬度は一定の値に低下してしまふ。而して一定の硬度に到達する迄の時間は焼入温度の高い方が概して短い。

(b) 何れの鋼種でも保熱時間同一ならば焼入温度高い程硬度は低い。

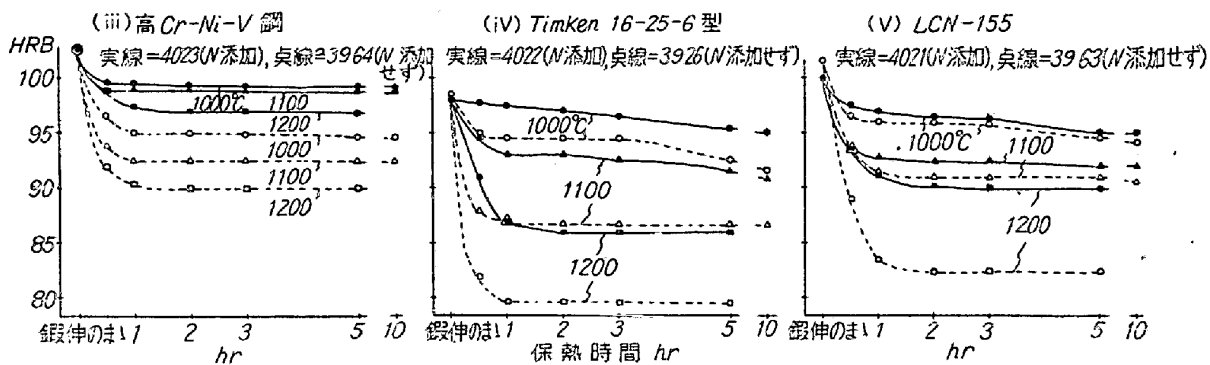
(c) 3 鋼種共に N を添加したものはしないものよりも硬度が高く、N の有無による硬度差は焼入温度高い場合程大きい。

(d) 焼入温度が高く且その保熱時間が長い程炭化物や窒化物等の固溶量が増し且鍛伸による纖維狀組織も消失するが、かゝる顯微鏡組織の詳細は省略する。

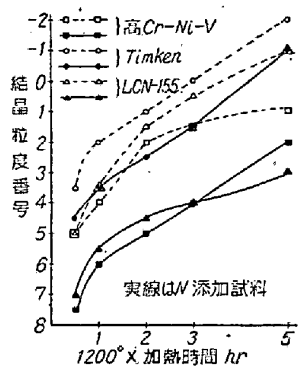
唯 1200°C 加熱の場合は何れの鋼種でも結晶粒界が判然と現われて居り、保熱時間が長くなつて硬度はもはや一定の値に到達してからでも、結晶粒の力は時間と共に大きくなる。而してこの結晶粒の粗大化は N の添加によつて抑制され、第 5 圖に示す様に何れの鋼種でも N を添加したものはしないものに比し粒度番號 2~3 だけ小さい粒を示す。



第 3 圖



第 4 圖



第 5 圖

(e) 1000~1100°C 程度迄はスケールの発生量は鋼種により餘り著しい差異を示さないが、1200°C になるとその差が著しく、Timken 16-25-6 型は意外に多量のスケールを発生する。
(以下次號え續く)

(昭和 25 年 5 月寄稿)

第 6 回 日 本 工 學 會 大 會

日 時 昭和 27 年 4 月 12 日 (土) 9 時—5 時

會 場 東京 大學 工 學 部

講 演

- | | | |
|-----------|----------------|------------------|
| 工業教育について | 東大教授 | 大山松次郎氏 |
| 電源開發について | 公益委員會
委員長 | 松永安左衛門氏
(交渉中) |
| 地下資源について | 東大教授 | 青山秀三郎氏 |
| 最近の海運と造船 | 運輸省
船舶局長 | 甘利昂一氏 |
| 陸運の現状と將來 | 日本國有鐵道
施設局長 | 立花次郎氏 |
| 工業製品の貿易問題 | (貿易廳長官に人選依頼中) | |