

ガスタービン翼用耐熱鋼に関する研究 (II)

耐熱鋼の研究 (VIII)

(昭和 26 年 4 月日本鐵鋼協會講演大會にて講演)

出口 喜勇爾*

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

Kiyoji Deguchi

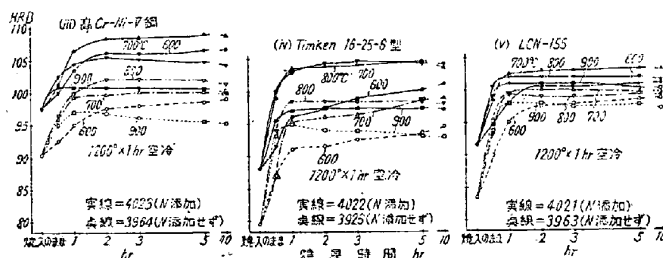
Synopsis:

Already described in the Report (I) of the previous issue.

(前號 32 頁より續く, Continued from P.32 of the previous issue)

VI. 熱処理による硬度及組織の變化

(2) 次に 1100 又は 1200°C×1hr 焼入後 600~900°C に於て 10hr 迄焼戻した場合の硬度變化を調べた。この中 1200°C 焼入の場合の方が硬度變化が著しいので、これのみを第 6 圖に示す。これらの結果によれば、



第 6 圖

(a) 何れの鋼種も、1100°C 焼入の場合には焼入後焼戻温度に保持する事 1~3hr, 1200°C 焼入の場合には 1~2hr 程度で概して一定の硬度に増加してしますが、焼戻温度の低い 600°C 程度のもは尙若干づつ増加し続ける傾向が見られ、特にこの傾向は 1100°C 焼入の場合に著しい。而して前述の硬度が一定の値に迄増加するに要する時間は焼戻温度高い方が概して短い。

(b) 一般に 600°C に比し 700~800°C に焼戻した場合が硬度が高くなるが 900°C になると却つて低下する傾向が見られる。然しこれには例外も可成り多い。

(c) 焼入のままの硬度が各温度に焼戻した爲に増加する数値は一般に 1100°C よりも 1200°C 焼入の場合の方が大である。

(d) 何れの場合でもやはり N を添加したものはしないものに比し硬度が高く、N の有無による硬度差は LCN-

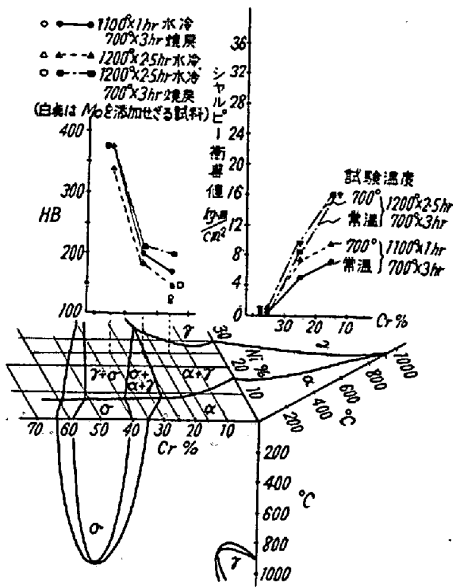
155 が他の鋼種に比して少い。

(e) 以上述べた硬度の變化は、基地に固溶した炭化物や窒化物等の析出が焼戻温度の上昇並びに保熱時間の延長により著しくなるが、焼戻温度が餘り高いと却つて地質が軟化する事、又焼戻により不安定オーステナイトが若干マルテンサイト化する事により説明されるが、「Timken の時効硬化は過飽和 γ からの σ (FeCr) の析出に基因する」との説³⁾には肯首し難い點がある様に思われるので、この點に關しては少しく詳しく述べる。

この説によれば「Fe-Cr-Ni 系に於て Cr 16, Ni 25% は σ の出現する界域には入らないが、これに Mo が 6% 添加された場合には σ の出現する界域が Fe-Cr 側からトンネル状をなしてこの成分に迄も張り出して来る爲に、焼入後の焼戻により σ の析出が起る」と云われる。扱て筆者が第 1 表中の No. 4179~4201 に示す如く Cr 16-Ni 25%, これに Mo を 6% 添加, 更にその Cr を 25, 35% と増加した試料を熔製 (アームコ鐵原料) し, 約 15mm 角に鍛伸 (Cr 35% 試料は鍛伸が甚だ困難で, 再熔解しては行方がどうしても所定寸法に迄は伸ばす事が出来ない)ので, 止むを得ず約 25mm 角 (鍛鍊係數約 3) で疵のない部分を使用した)後, 各種熱処理を行つた場合の硬度, 組織及常溫並びに高温衝擊値の變化を測定した結果の一部を第 7 圖に示す。これによれば

(i) 1100~1300°C で 30min~5hr 加熱水冷, 600~700°C で 3hr 焼戻した場合の硬度は, 何れの場合も, Cr 16%-Ni 25% に Mo を 6% 添加, 更にその Cr を 25% に増加するに従い若干づつ増加 (硬度範圍はブリネル約 150~200) するが, その Cr を 35% に増加した時には飛躍的に増加してブリネル 350~400 を示す。

* 日本特殊鋼株式會社



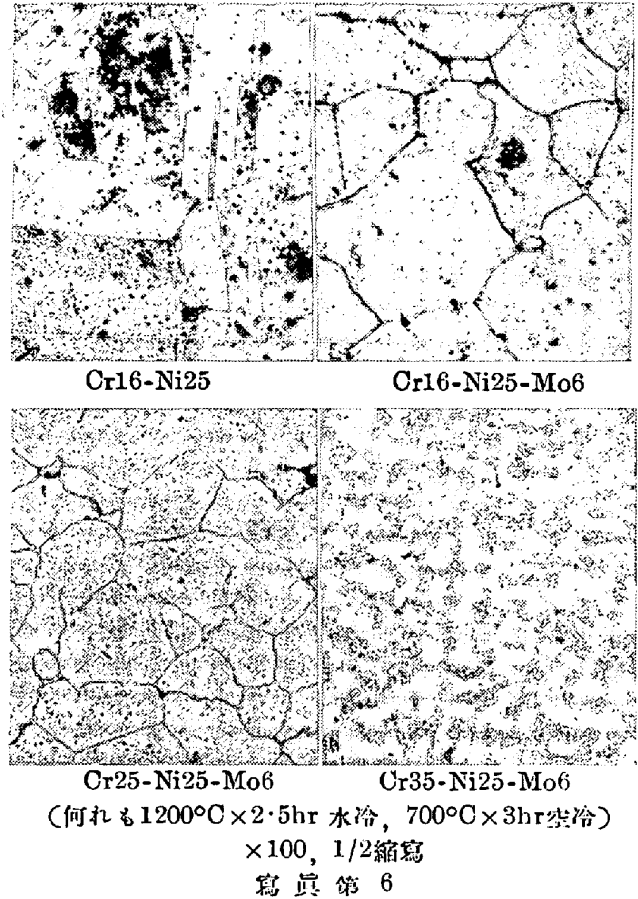
第 7 圖

(ii) シャルビー衝撃値は Cr 16%-Ni 25% では甚だ高く 30kgm/cm² 前後を示すが、Mo を 6% 添加すると著しく低下して 8kgm/cm² 前後となり、Cr を 25% に増加するとこれが更に若干低下するが、この場合も Cr を 35% に増加した時は常温でも高温でも 0.1~0.7 kgm/cm² となり、破面は硝子状を呈する。

(iii) 顕微鏡組織は Cr16%-Ni 25% では 1100°C x 1hr 水冷で典型的のオーステナイトの龜甲狀結晶粒のみを示すが、これに Mo 6% 添加したものは 1100°C 水冷では炭化物等の微粒の集合したものが鍛伸方向に並列するのみで、これを焼戻すると並列した微粒の間に結晶粒界が現われる。然しこの成分でも 1200°C 水冷では龜甲狀オーステナイト粒と不溶解炭化物等の微粒が認められ、焼戻によつて、かゝる微粒が粒界粒内に増加する、Cr が 25% に増すと、微粒が更に増加し結晶粒が小さく且餘り龜甲狀を呈さなくなり、σ が少しく析出している様である。然るに Cr 35% になると、寫眞第 6 に示す如く、これらは全然異り σ が著しく析出している。

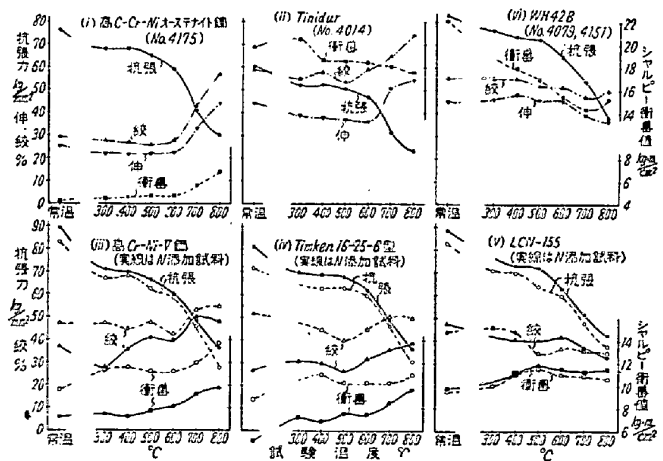
以上の諸結果により、Cr16%-Ni25% に Mo を 6% 添加しても、Mo 炭化物等が激増する爲の著しい諸性質の變化はあるが、金相學的 Phase としての脆弱なる σ は現われない。σ は Mo を添加した場合でも Cr が 25% ~35% に増加する時に出現するものと考えられる。(然しこの際 Cr35% 試料の 1100~1300°C 焼入したまゝの硬度は餘り低くならない、この點に關しては更に検討中である)。

VII. 高温抗張及衝撃試験



寫眞第 6
×100, 1/2縮寫

鍛伸した試験棒を何れも 1100°C x 40~60min 空冷、800°C x 1hr 空冷後 800°C迄の各温度に於て高温抗張、衝撃 (シャルビー) 試験を行つた。主なる試料の試験結果の概略を第 8 圖に示す。



第 8 圖

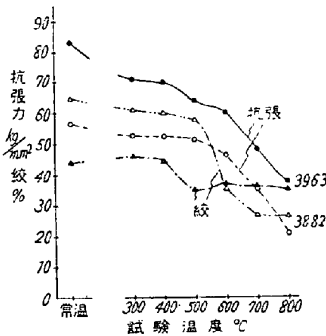
(1) 先づ高温抗張試験結果によれば
(a) 全試料の結果を總括的に見ると、含窒素 LCN-155 が最も優秀で 800°C に於て抗張力實に 42kg/mm² を示す。次は WH42B, N を添加しない LCN-155, N を添加した Timken 16-25-6型で、800°C に於て 37kg/mm² 前後を示し、次は N を添加しない Timken (標準

の No.3926 に對し No.3843 はCが少しく高い爲 700~800°C に於て抗張力が 1~2kg/mm² 高い), 高Cの Cr-Ni オーステナイト鋼 (No.3838, 3841, 4175 によつて, 少量の Ti 添加の影響, この程度の Cr, Ni 量の差による影響を試験したが, 特記する程の結果は認められなかつた) で 800°C に於て 30~32kg/mm² 程度を示し, Tinidur は豫想に反して餘りよくなかつた. 伸, 絞は抗張力高きものでも餘り低い事はなく, WH42B では特に高い.

尙参考の爲に述べれば, 800°C に於て, 1301* は約 25 kg/mm², 1311* は約 30kg/mm² を示す. 前述した如く, 筆者が従來行つた研究では, 鍛造にそれ程困難を伴はない耐熱鋼の高温抗張力の極限は 800°C に於て概して 30kg/mm² 前後と考えられていたが, こゝに研究したこれら最高級耐熱鋼の高温抗張力がかゝる極限を遙に越すものであつて, 鍛伸にあの様に困難を感じたのも宜なるかなと思われる.

(b) 高温抗張試験結果に及ぼす N 約 0.15~0.20% の影響は, 一般に常温~800°C に於て抗張力約 10~5kg/mm² を増し, 特に 800°C に於て約 5kg/mm² 前後を増すが, 伸, 絞は餘り低くない事は十分注目すべきである. これは窒化物の微粒が迂り抵抗を増大させる爲と考えられる.

(c) LCN-155 の系統では試験温度が高く 800°C になると伸, 絞が却つて低下する傾向があり, これは第 9 圖に示す如く, W, Mo を含まず Cr の低い No.3882 に

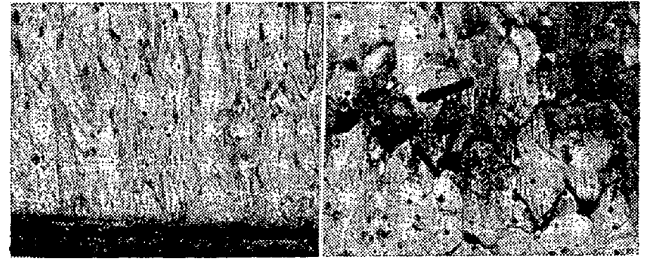


第 9 圖

*

	C	Cr	Mn	Cr
1301	0.35~0.45	1.5~2.5	<0.6	13.0~15.0
1311	0.10~0.20	0.8~1.2	13.0~15.0	10.0~12.0
	Ni	W	V	N
1301	14.0~16.0	2.0~3.0	—	—
1311	—	—	0.6~1.0	0.1~0.2

於て特に著しい (No.4057 はこの兩曲線 の中間の値を示す) 今これの常温及 800°C 試験残材の破断部の縦断面の顯微鏡組織を見ると, 寫眞第 7 に示す様に, 結晶粒が常温試験のものは伸張方向に十分に伸び切つてゐるが, 800°C 試験のものは伸張方向に僅かに伸びた龜甲状をなし結晶粒界に多數の龜裂を生じてゐる, 蓋しこれは再結晶温度が低い爲と考えられる.



常温試験 800°C 試験 ×100(1/3 縮寫)
寫眞第 7

(2) 次に高温衝撃試験結果によれば

(a) 高 C-Cr-Ni オーステナイト鋼は C が高き爲か高温抗張力はそれ程高くないのに高温衝撃値は低く, Tinidur は高温抗張力低き爲高温衝撃値の甚だ高い事は異とするに足らないが, WH42B は高温抗張力が甚だ高いにも拘らず高温衝撃値も又甚だ高い事は十分注目すべき性質である.

(b) N が含まれると高温衝撃値は, Timken, 高 Cr-Ni-V 鋼では約 2~4kgm/cm² だけ低下するが, LCN-155 では殆んど低下しない (高温抗張試験の伸, 絞に於ても同様の傾向が見られる).

VIII. 高温匍匐試験

實驗の都合で一應 600 及 700°C** に於ける高温匍匐強度を主なる試料に就いてのみ測定した: 試験機は當所で設計試作したもの⁴⁾ により, 要領は次の通りである.

- (i) 豫熱時間 1hr
- (ii) 豫備荷重 0.6kg/mm²
- (iii) 測定時間 6hr
- (iv) 匍匐度決定時間 3~6hr
- (v) 匍匐限とする匍匐速度 $5 \times 10^{-3}\%$ hr
- (vi) 測定温度の精度 5°C

測定結果のみを挙げれば第 2 表の通りである.

上掲匍匐強度は絶対的の数値とは云い得ないが, これによつて各鋼種相互間の相對的比較は出来ると思う. こ

** 700°C で測定する豫定であつたが, 温度計の補正の都合で眞温度は 725°C

第 2 表

鋼 種	チャージ番號	高温 匍匐強度 (kg/mm ²)		
		600°C	725°C**	
高 Cr-Ni-V	N 添加せず	4120	19.1	6.8
	N 添加	4093	22.4	7.5
Timken 16-25-6 型	N 添加せず	4111	22.6	7.8
	N 添加	4092	25.4	10.3
LCN-155	N 添加せず	4112	26.3	14.2
	N 添加	4131	31.4	19.9
WH42B I 301		4113, 4129, 4147	32.7 16.0	15.5 11.0(700°C にて)

れによれば

(1) 前述した如く、WH42B は高温抗張力、衝撃値共に甚だ高い値を示したが、これの高温匍匐強度も又甚だ大で 600°C では約 33kg/mm²、700°C では約 16kg/mm² を示す。これに對し含窒素 LCN-155 は 600°C では若干低く約 31kg/mm² であるが、700°C では却つて高く約 20kg/mm² を示す。鋼種別に見れば LCN-155、Timken 16-25-6、高 Cr-Ni-V 鋼の順に小さい値を示し、これら鋼種間の匍匐強度の差は試験温度高い方が著しく表われている。

(2) 何れの鋼種に於ても N を添加したものは匍匐強度が増し、600°C に於て約 2~5kg/mm²、725°C に於て 1~5kg/mm² だけ大となる。而してこの影響は高 Cr-Ni-V 鋼に於て最も少く LCN-155 に於て最も著しい。

(3) WH42B や N を添加した LCN-155 の匍匐強度は概略 I 301 のその 2 倍近くを示し、高温抗張力の場合と同様高温匍匐強度の増加に對し Co の添加は甚だ有効である事を知る。

以上述べた高温抗張、衝撃、匍匐試験結果により、ガスタービン翼としては、WH42B、含窒素 LCN-155 がこれらの中で最も望ましいが、N を添加しない LCN-155 か又は N を添加した Timken 16-25-6 型も推奨出来ると思われる。或は性能が若干低下するが含窒素高 Cr-Ni-V 鋼も注目されよう。この際問題となるのは、

(1) Ni, Co の入手難

(2) N 添加の煩雜さ

(3) 現場的に鍛造の困難な事

である。(3) は技術的に解決し得る問題であり、(2) は不可能とは云えないが、(1) は原料問題として現状では解決容易ではない。然し従來の如く I 301 程度の材料を以てガスタービン翼を製作する限りに於ては、前述の諸試験結果より考えても、ガス温度を餘り上げる事は出

来ず、従つて熱効率よきガスタービンは到底期待出来ない事を知る。

IX. 總 括

以上述べた所を總括すれば次の通りである。

(1) ガスタービン翼用耐熱鋼として (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) WH42B の各系統に就き研究し、特に (iii)~(v) に對しては、窒化した Ferro-Cr を N の母合金に使用して、0.15~0.20% 添加した N の影響を檢討した。

(2) これらの鋼種は熔製した鋼塊を試験片に鍛伸する事が一般に甚だ困難なものが多い。筆者は熔解原料、熔解方法と共に鍛造法に就き主として顯微鏡組織の考察等によつて色々と検討しながら、かゝる技術的困難を克服して試験片を鍛伸し、我國では始めてこれら最高級耐熱鋼の高温機械的諸性質等を出るだけ詳細に研究した。

尙結論的に云えば、高 Cr-Ni-V、Timken、Tinidur、LCN-155、WH42B の順に鍛造困難となり、又 N を添加したものは、しないものよりも困難である。

(3) 鍛伸した試験片を 1000~1200°C にそれぞれ 10hr 迄加熱した場合、次に 1100~1200°C × 1hr 焼入後 600~900°C にそれぞれ 10hr 迄焼戻した場合の硬度、組織の變化を調べた。この際 N が約 0.15% 含まれると概して硬度は何れの場合も増加しているが、この増加量は焼入温度高い場合程大であり、又 LCN-155 では他の鋼種に比して N の有無による硬度差が少ない。

(4) 高温度に長時間保持した場合の結晶粒の粗大化は N の添加によつて抑制され、何れの鋼種でも粒度番號 2~3 だけ粒が小さくなる。

(5) Timken 16-25-6 型の時効硬化は過飽和 γ から σ の析出に基因するという説には肯首し難い點のある

事を筆者の行つた実験結果によつて説明した。

(6) 次に鍛伸した試料を 1100°C 焼入(空冷)、800°C 焼戻後 800°C迄の各温度に於て高温抗張試験を行つた、これによれば含窒素 LCN-155 が最も優秀で 800°C に於て抗張力約 42kg/mm²、次は WH42B, N を添加せざる LCN-155, 含窒素 Timken で 37kg/mm² 前後を示し含窒素高 Cr-Ni-V 鋼もこれに近い値を示すが, Tini-dur は豫想に反して餘りよくない。然して伸、絞も相當大なる値を示し, WH42B は特に高い。

(7) N が添加されると各鋼種共に常温~800°C に於て抗張力約 10~5kg/mm² を増す。

(8) 高温衝撃値は抗張力の高くない Tinidur では勿論のこと、高温抗張力の甚だ高い WH42B に於て非常に高い。又 N が添加されると、高 Cr-Ni-V 鋼, Timken では約 2~4kgm/cm² だけ低下するが、LCN-155 では殆んど低下しない。

(9) 主なる試料に就き 600 及 725°C の高温匍匐強度を測定した。その結果によれば、高 Cr-Ni-V 鋼, Timken, LCN-155, WH42B の順に強くなり、それら匍匐強度の差は試験温度高い程著しく表われる。又 N が添加されると匍匐強度が増す。

(10) これらの諸試験結果により、ガスタービン翼には如何なる鋼種を選ぶべきか、又その際の諸問題に就き考察した。

終りに臨み、原料不足の折柄本研究を遂行させて下された故渡邊社長並に大河原現社長、ガスタービン製造研究会委員として種々御連絡下されし石原製鋼部長、種々

御指導下されし上に本研究の発表を許可さるゝ様格別御骨折下されし玉置研究部長、又御教示を戴きました村上先生に對し深甚の謝意を表し、試料の熔解、ガス分析にて御協力されし森脇、澤の兩氏、又試料鍛伸の爲の甚だ面倒なる各種の要望に對し長らくの間終始心よく全面的に協力されし鍛冶工場の各位に厚く御禮申し上げる次第である。(昭和 26 年 5 月寄稿)

文 献

- 1) C. C. Hall, Iron & Steel, Aug. 1946, 455; Sept, 1946, 499.
C. H. Smith, The Iron Age, Nov. 1946, 42.
N. J. Grant, Tran. Amer. Soc. Met., Preprint No. 2 (1946), 45.
C. T. Evans, Metal Progress, Preprint No. 31 (1945), 3.
G. V. Smith, AIME, Oct. 1950, 800.
H. Scott, J. Iron & Steel Inst., Feb. 1951, 121.
F. S. Badger, F. C. Kroft, Metal Progress, Sept. 1947 (譯: 金屬, 5 月 (1951), 333)
芥川 武, 鐵と鋼 (技術資料), 36 (昭25), 500
- 2) 出口, 鐵と鋼, 29 (昭18), 233; 35 (昭24), 305; 35 (昭24), 349; 36 (昭25), 216.
- 3) 武田, 永井, 花井, 昭和 26 年 4 月日本鐵鋼協會講演大會講演
- 4) 出口, 鐵と鋼, 36 (昭25), 30.