

耐熱合金に関する諸問題*

佐藤 忠 雄**

SOME PROBLEMS ON HEAT RESISTING ALLOYS

Tadao Sato, Dr. Eng.

Synopsis:

Recently the heat resisting alloys have made remarkable developments. There are few differences in the essential consideration of chemical constituents, but the aging time has been so prolonged that the stability of structure and strength at elevated temperature much increased. In heat-resisting alloys, some phenomena such as creep and fatigue take place under repeated stresses during practical use.

The transformation and precipitation of the alloys are accelerated by these repeated stresses so that there occurs a change of the volume and a decrease in the creep or the fatigue strength.

Further, a systematic research on these problems is needed. It is also presumed necessary that new manufacturing techniques, for example, vacuum-melting, vacuum-casting and hot-extrusion should be introduced for further improvements in heat resisting alloys.

I. ま え が き

日本でガスタービンあるいは排気タービンなどに使用する耐熱鋼について本格的に研究を始めて以来 17・8 年を経過している。その間欧米各国における耐熱材料の研究は著しい進歩発展を示している。これらの耐熱合金について最近の問題点を二、三採り上げて見よう。

II. 耐熱合金の組成について

わが国がブラウンボベリー社より航空発動機用排気タービン過給器を輸入し、これにならつて国産排気タービンを製作しようとして企てたのは昭和 15 年頃であつて、当時のタービン翼車に使用された材料は旧航格イ 306 である。これはクルップの V2A-EXD にならつたもので、18-8 オーステナイト鋼に Mo, W, Ti を加えたものである。この材料は K.W.I. No. 3 法の短時間クリープ限度が 600°C で約 12kg/mm² である。溶解、鍛造、熱処理が容易で、翼と車盤の溶接は 18-8 Cb 溶接棒を用いてきわめて容易に行われた。現在米国でさかんに使用されている 19-9 DL はこのイ 306 の Si% を下げ、Mo% を上げ、さらに Cb を加えた改良型といふことができる。

その後本格的なガスタービンの製造が行われるにおよんで、国内資源の関係から Mn-Cr-W 鋼 (イ 307), Mn-Cr-V 鋼 (イ 309), Mn-Cr-V-N₂ 鋼 (イ 311) が研究され、最終的にはイ 311 が最も優秀な性能を示した。この材料のクリープ限度は K.W.I. No. 3 法で 700°C において約 15kg/mm² であつて、イ 306 よりは

遙にすぐれたものである。しかしこれらの高 Mn-Cr 鋼の多量生産に対しては、溶解炉のライニングが侵され易く、鍛造時には厚いスケールが生じ易く非常な困難をともなつた。溶解炉には高純度のマグネシアライニングを施し、またタービン翼の精密鍛造には今日の hot-cold working と同様な鍛造法を行い、そのまゝ時効を施すなど今日の耐熱合金の製造技術と比較して、その考え方はほぼ同様である。

また排気タービンには旧航格イ 302 の低炭素のものが用いられたが、今日の 12% Cr 鋼 H46 はイ 302 の Si% を下げて V と Cb を加えた改良型である。

戦後高 Mn-Cr 鋼はわが国では全く顧みられていないが、欧米では 18-8 系耐熱鋼の代用としてあらためて研究されているようである。

現在欧米各国で使用されている耐熱合金のうち代表的なものを示すと Table 1 のようになる。すなわち Cr-Ni 耐熱鋼では 18-8 系の改良型として 19-9 DL, 15-14 系の進歩したものとして 16-25-6, さらに Cr-Ni-Co 合金として G18B, LCN-155 および S 816, 高 Co-Cr 合金として Vitallium, Ni-Cr 合金では Inconel X, Nimonic 90 または 95 などをあげ得るであろう。

これらの耐熱合金はすべてオーステナイト系で、その基本的な考え方としては従来の耐熱鋼と全く同様であつて、高温の耐蝕性を高めるために高 Cr とし、高温強度を高める目的で Mo, W を加え、さらに C または N₂ と

* 昭和 32 年 4 月本会講演大会における特別講演

** 日本特殊鋼株式会社製鋼部次長兼研究部次長 工博

Table 1. Chemical constituents of heat resisting alloys.

Alloys	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Ti	N ₂	Cb	Co	Al
イ. 307	0.15	1.0	16.0	11	—	0.3	2	—	0.3	—	—	—	—
イ. 309	0.22	1.0	16.0	11	—	—	—	0.75	—	—	—	—	—
イ. 311	0.15	1.0	14.0	11	—	—	—	0.7	—	0.15	—	—	—
イ. 306	0.10	1.2	0.5	17	9	0.5	1.2	—	0.3	—	—	—	—
19-9D L	0.30	0.7	0.6	19	9	1.3	1.2	—	0.2	—	0.4	—	—
イ. 301	0.40	2.0	0.5	15	14	—	2.5	—	—	—	—	—	—
Timken 16-25-6	0.10	0.9	1.5	16	25	6	—	—	—	0.15	—	—	—
G 18 B	0.40	1.0	0.8	13	13	2	2.5	—	—	—	3	10	—
LCN-155	0.15	0.5	1.5	20	20	3	2	—	—	0.12	1	20	—
G 42 B	0.30	1.0	0.8	19	15	3	3	—	0.8	—	—	24	—
S-816	0.40	0.3	0.6	20	20	3	4	—	—	—	4	45	—
G 32	0.30	1.0	0.8	19	12	2	—	2.8	—	—	1.2	45	—
Vitallium	0.25	0.6	1.0	28	2	6	—	—	—	—	—	64	—
Inconel X	0.05	0.4	0.5	15	75	—	—	—	2.5	—	—	—	0.7
Nimonic 90	<0.1	0.7	0.5	20	60	—	—	—	2.0	—	—	18	1.0
イ. 302	0.40	2.2	0.4	12	—	1	—	—	—	—	—	—	—
H 46	0.20	0.3	0.4	11	—	0.5	—	0.7	—	—	0.15	—	—

結合しやすい V, Cb, Ti などを加えて析出硬化を期待するとともに組織の安定化を計り、しかも安定な完全オーステナイト組織とするために Ni を高め、さらに高温強度を改善するために Ni を Co で置き換えて、最後に到達したものが S-816 ということができる。またステライトの改良型としてその靱性を改善する目的で C と Cr 含有量を下げ、高温の強さを高めるために Mo を加えたものが Vitallium であり、ニクロム合金に Co と Ti, Al を加えて高温強さを改善し、析出硬化を期待した高温における組織の安定性を向上したものが Nimonic であると解される。これらの各系統毎に発達した合金も近年では次第に相接近した組成となつて来ていることは興味あるところである¹⁾。

したがって溶体化と時効、あるいは hot-cold work と時効によつて析出硬化と高温における組織の安定化を期待することも本質的には変つていないが、しかしこれらの新しい合金の時効がいちじるしく長時間にわたることは、それだけ高温における長時間の寿命に対して組織的に安定な材質になつたことであつて、高温強さの向上とともにいちじるしく改良された点であろう。後述する如く高温に長時間使用されたときにも組織的に変化が少なく安定であることは耐熱合金としてきわめて重視されなければならない点であると考えられる。

III. 耐熱合金に要求される強さ

これらの耐熱合金に要求される強さについて、どのような方向に研究が進んでいるかを見ると、戦前行われたようないわゆる短時間クリープ試験法は実用的に意義がとぼしく、その部品の寿命を考慮に入れた長時間クリープ試験として 10,000 時間、またはクリープ破断試験として少くとも 1000 時間の試験が行われる建前となり、また高温の疲れ試験のデータが同時に考慮されている。

これらの試験法はすでに JIS に規定されているが、しかし実際のタービン翼あるいは車盤に働く応力の状態はこのような単純な応力の状態のみで表わしうるかどうかについては多くの問題があるようである。

すなわち実際のタービン等では、動翼には多かれ少かれ振動応力が発生する可能性がある。戦時中ネ 20 ガスタービン動翼に発生した折損事故はほとんどこの振動応力の集中によるものと考えられる場合がしばしば経験された。またタービン翼の温度は恐らく運転中多少の変動であろう。さらに Fig. 1 に示すように航空機用ガスタービン等のような場合には、起動、停止の度毎に繰返し大巾な加熱、冷却を受け、このような繰返し加熱冷却によつてタービン翼車の外周には遠心力による応力よりも遙に大きな熱応力を発生し、材料は大きな繰返応力を受けることになる²⁾。

たとえば Fig. 2 は N-155 に各種の繰返応力を加えたときのクリープ線図であつて³⁾、応力振巾が大きくなる程クリープ強さが低下するが、負荷時間が短く、応力

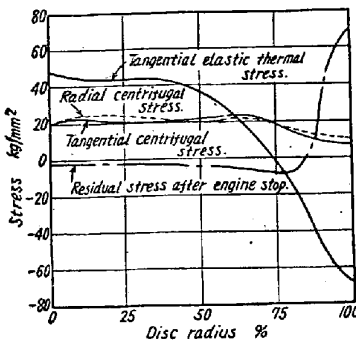


Fig. 1. Stress of turbine disc.

が大きい程その影響が大である。これを応力振巾と平均応力との関係に書き直すと Fig. 3 のようになり、負荷時間が長くまた繰返応力の振巾が大きいときは、平均応力がわずかに増加してもクリープがいちじるしく進行することを示している。

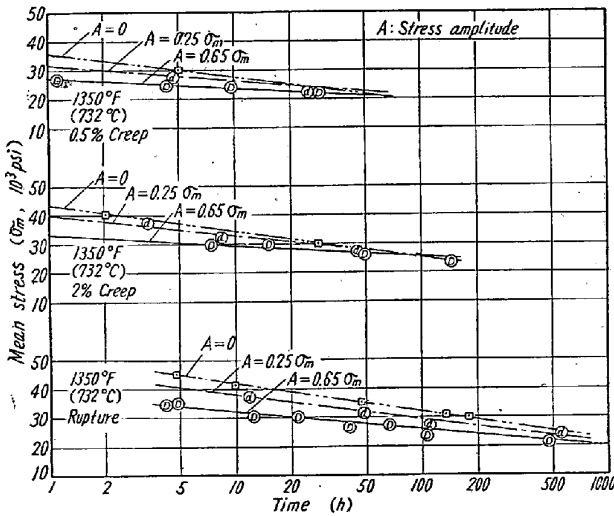


Fig. 2. N-155, creep diagram under repeated stress.

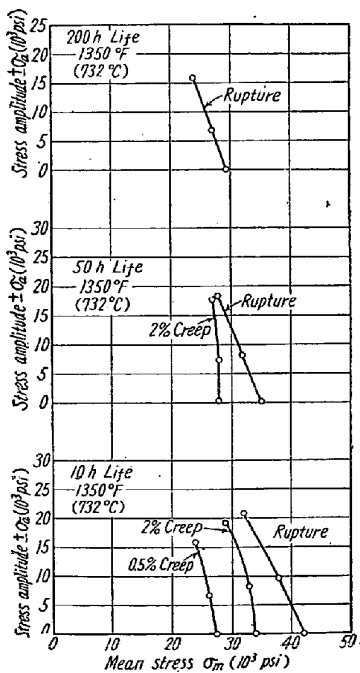


Fig. 3. N-155, creep under repeated stress.

るしく、低温で靱性が不足してくると切欠によってクリ

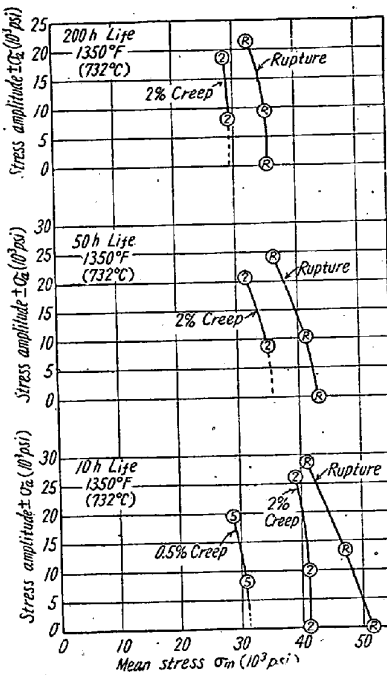


Fig. 4. S-816, creep under repeated stress.

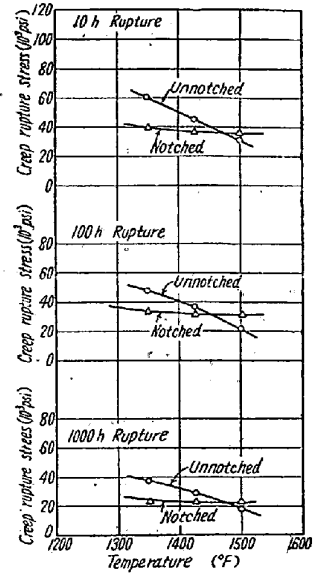


Fig. 5. Notch effect on creep rupture stress for Inconel X

Fig. 4 は S-816 についてのクリープ線図であつて、N-155 の場合と同様な関係にあるが、S-816 が N-155 に比して遙かに強力であることがわかる。

Fig. 5 は Inconel X についてクリープ破断強さにおよぼす切欠の影響を示したもので、そのときの温度によって切欠の影響がいちじるしく変化することを示している。すなわち比較的高温で十分材料が靱性に富む間は切欠部のクリープがいちじ

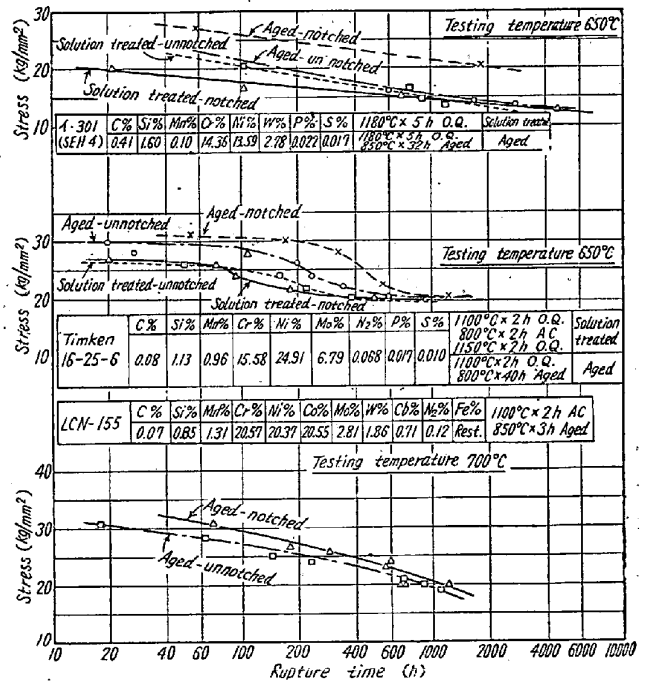


Fig. 6. Relation between creep rupture stress, heat treatment and notch of specimen.

ープが抑制されて破断し易くなる。また Fig. 6 では各種耐熱合金のクリープ破断強さにおよぼす熱処理法および切欠の影響が示されているが、熱処理法によって切欠の影響がことなり、また負荷時間の経過とともにその影響がいちじるしく変化することが示されている。このことは高温で長時間使用中に変態または析出が進行して材質が脆化すること、および時効を施すことはこの脆化

を阻止することを示している²⁾。

このようにタービン翼車には高温において各種の原因によつて、各種の周波数と振巾の繰返応力がかさなり合つて負荷される。常温の疲れ試験における重複荷重あるいは変動応力の問題はすでに 10 数年前にわが国がいち早く採り上げたが、今日においても各国でこれを大きく問題としている。しかしまだ多数の問題が未解決である。

耐熱合金においては上述の温度変化の影響が加算されるから、問題はますます複雑さを加えるわけであるが、早急に解決されなければならない点である。

このような応力に関する問題に関連して、前述のようにこれらの高温における複雑な応力繰返によつて材料は変態または析出が促進される。しかもこの変態または析出はクリープを進行させる。すなわちこれらの高温において部品が使用されている間に進行するクリープおよび変態または析出によつて、耐熱合金のクリープ強さまたは疲れ強さに変化を生ずる。一方においてはこのような変態あるいは析出は同時に常に容積変化をとともなう。したがつて予期しないクリープ歪の増加あるいはクリープ破断が起ることがありうるわけで、これらの解明に最近では dislocation theory が導入されているが、今後に残されている本質的な難しい問題である。

IV. 耐熱合金製造技術の諸問題

近年タービン翼、ノズル等に機構上幾多の新しい試みがなされ、中空翼、中空ノズルプレート等により材料の温度上昇を抑制しようと企図しているようである。このようにして各構成部材の温度がたとえば 700°C におさえられるならば、タービンの性能向上に対する耐熱合金の負うべき役割が幾分でも軽減されよう。しかしこれに対しては耐熱合金による中空部品の製造法等に関する新しい研究問題が発生する。

耐熱合金は前述の通り、ほとんどそのすべてが多量の Cr および Ni, Co などを含有し、その溶解にはガス成分の吸収が附随する。またこれに添加される合金元素はすべてこれらのガス成分と結合しやすい。たとえば Mo のごときは高温加工のときに酸化蒸発がいちじるしい。

さらにこれらの高級合金の原料として配合される金属地金、フェオアロイの性状は製品の性状に決定的な影響をあたえるであろう。この場合微量の含有不純物あるいはガス成分の影響を除去することはきわめて困難な問題であることは想像に難くない。

これらの溶解技術上の難点について、たとえばアークメルト法その他の減圧溶解乃至真空溶解法、真空鑄造法がすでに諸外国において工業的に実施され、わが国においても漸次実施されつゝあるようである。真空溶解、真空鑄造によつて耐熱合金のクリープ強さ、疲れ強さが向上し、耐蝕性が改良される等、その性能がいちじるしく改善されることは文献に示されている通りである。

耐熱合金の圧延、鍛造にも多くの難点を含んでいるが連続鑄造法、熱間押出等の新しい技術は最近わが国においても実施の段階に至つているようである。とくに熱間押出材は耐熱合金の鍛造をいちじるしく容易にすると伝えられており、耐熱合金の性能向上にいちじるしい効果をあげるものと期待される。

V. む す び

実際のガスタービン等の高温における応力の状態が詳細に解析され重点的に考慮すべき応力の状態とその発生源が判明すれば、これにともなう変態または析出の進行と、クリープおよび疲れ強さの変化などについての研究が今後いちじるしく促進されるであろう。これらの組織の変化を阻止して、材質を安定にし、あるいはこれを有効に利用することの研究と、耐熱合金の製造技術の研究を結びつけた一貫した耐熱合金の研究体制の確立が要望されるとともに、その成果として新しい技術が生み出されることを期待する。(昭和32年5月寄稿)

文 献

- 1) 佐藤：機械学会誌 55 (1952) 260
- 2) 岡崎：機械学会“高温における強度上の諸問題”座談会資料 (昭. 31)
- 3) B. J. Lazan, Proc. A.S.T.M. 49(1949)757/787
- 4) B. J. Lazan, “ ” “ ”
- 5) 金森：機械学会“耐蝕および耐熱材料”座談会資料 (昭. 30)