

7) 井上, 笹木: 住友金属製鋼所, 研究報告第3105報  
(昭.30 6)

8) 河井, 益子: 鉄と鋼, 41 (1955) 435

9) 益子: 鉄と鋼, 42 (1956) 482

## Timken 16-25-6 の高温機械的性質に関する研究 (V)\*

長谷川 太郎† · 落 合 治†

### STUDIES ON MECHANICAL PROPERTIES OF TIMKEN 16-25-6 AT ELEVATED TEMPERATURES (V)

*Taro Hasegawa and Osamu Ochiai*

#### Synopsis:

The authors studied the mechanical properties of four turbine rotors of Timken 16-25-6, to compare with that of the forged bars, of which they reported already. The results were as follows:

1. The effects of heat treatment on mechanical properties in the turbine rotors are the same as the forged bars. The "hot-cold worked" rotors have higher strength than the precipitation-hardened rotors.

2. The "hot-cold worked" rotors have the similar or somewhat lower value of the creep rupture strength and tensile and proof strength as compared with the forged bars. The rotor which have sufficient forging effects, have great ductilities and uniformity of mechanical properties.

3. The precipitation-hardened rotors have nearly the same mechanical properties when compared with the forged bars.

4. When forging effect of the rotor are insufficient, the clear pattern of micro-segregation are recognized, so that the ductilities are low and not uniform.

5. The mechanical properties of specimens which are taken in tangential or radial directions from the boss part of the upset rotor are lower in ductility than that taken from the rim part of rotors. It is because of the metal flow of the boss part that is across with the tensile direction.

#### I. 緒 言

前報まで<sup>1)~4)</sup>に Timken 16-25-6 の鍛伸試験材について高温機械的性質におよぼす熱処理の効果について述べてきた。しかるに本材の用途はガスタービンおよびジェットエンジン用ローターのごとき大型鍛造材であり, このような大型鍛造材実体の機械的性質が実用上問題となる。本報では4個のローター実体の機械的性質を調査して鍛伸材の機械的性質と比較検討したいと思う。

#### II. 供試材および試験法

供試ローターは Table 1 に示す化学成分のもので, いずれも標準成分の Timken 材で製造工程の概要は Table 2 に示すごときものである。すなわち A, B は P. H. 状態のローターで C, D は H. C. W. 状態であり,

A, BではB, C, DではDがそれぞれ鍛錬効果の大きい鍛造法を採用している。

各ローターはX線またはγ線透視, 超音波探傷, 浸透液探傷による内部および表面欠陥検査を行なつて欠陥のないことを確認し, さらに縦または横断面のマクロ腐蝕によるメタルフロー, 欠陥等を調査して爾後の機械的性質顕微鏡組織をしらべた。ローターでは切線および半径方向の応力が最も大きいので, 試験片はこの方向より採取し, また試験温度は使用条件に適するごとく 650°C または 675°C と常温の2種とし短時間引張試験およびクリープ破断試験を行なつた。これ等の試験法は前報までにのべたので省略する。

\* 本会昭和 31 年春季講演大会にて発表。

†, †† 住友金属工業 K. K 製鋼所

Table 1. Chemical composition of rotor wheels tested.

Symbol	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N <sub>2</sub>
A	0.09	0.74	2.35	0.022	0.023	17.75	25.39	6.19	0.15
B	0.05	0.45	0.48	0.013	0.010	17.43	25.48	6.18	0.15
C	0.05	0.68	2.22	0.015	0.026	15.68	26.60	6.22	0.16
D	0.08	0.44	0.81	0.017	0.016	17.39	25.22	5.67	0.15

Table 2. Outline of manufacturing procedure of rotor wheels tested.

Symbol	Ingot	Type of rotor wheel	Forging procedure	Heat treatment
A	Small	Disc of 250 mm dia	Upset directly from ingot	1200°C×4h oil quenched 750°C×25h air cooled
B	Large	Rotor shaft of 370 mm dia	Swaged and upset	700°C×6h air cooled 750°C×24h air cooled
C	Small	Disc of 250 mm dia	Swaged and upset	Hot cold worked at 700°C 700°C×10h air-cooled
D	Large	Disc of 500 mm dia	Swaged and upset	Hot cold worked at 700°C 650°C×10h air-cooled

Table 3. Tensile properties of rotor wheels.

Symbol of rotor	Location of specimen and direction of tension	Testing temperature	Yield strength kg/mm <sup>2</sup>	Ultimate strength kg/mm <sup>2</sup>	Elongation %	Reduction of area %	Hardness B.H.N.
A	Rim, Tangential	Room	49.4	90.0	24.0	22.8	240
	Boss, Tangential	〃	57.7	90.9	22.9	22.8	236
	Rim, Tangential	675°C	34.8	53.3	18.6	19.2	—
	Boss, Tangential	〃	43.9	52.0	28.6	29.7	—
B	Rim, Tangential	Room	45.1	71.1	24.5	20.2	182
C	Rim, Tangential	Room	78.9	87.0	12.0	15.5	257
	Boss, Tangential	〃	90.1	97.1	8.0	11.8	253
	Radial	〃	84.2	92.2	12.9	17.4	253
	Rim, Tangential	675°C	42.6	49.8	20.8	29.5	—
	Boss, Tangential	〃	41.8	50.8	19.5	22.2	—
	Radial	〃	—	50.7	14.7	22.2	—
D	Rim, Tangential	Room	63.6	92.8	30.3	41.1	248
	Boss, Tangential	〃	66.2	94.2	23.1	28.0	268
	Rim, Radial	〃	59.3	89.1	22.9	41.1	255
	Boss, Radial	〃	66.5	85.7	10.0	13.7	253
	Rim, Tangential	650°C	40.0	51.1	38.6	50.2	—
	Rim, Radial	〃	39.6	52.1	31.0	48.4	—

### III. 短時間引張試験結果

引張試験結果を Table 3 に示し、またこの結果を既報の鍛伸材の引張試験結果と比較対照して Fig. 1, 2 に示す。

1. P.H. 処理を施したローターA, Bは H.C.W. したローターC, Dに比し耐力が低いことは鍛伸材と同様であるが、P.H. 状態のローターは鍛伸材より耐力は高く、H.C.W. 状態のローターは鍛伸材より耐力は低い。

2. H.C.W. 状態のローターはいずれも抗張力は鍛伸材より若干低目であるが、P.H. 状態のローターAのみは抗張力は異常に高い値を示す。

3. P.H. 状態のローターは常温では鍛伸材に比し伸は大きいが絞は小さい。然るに高温では伸、絞共に鍛伸材に劣っている。H.C.W. 状態のローターは鍛伸比の大きいDの外周部は常温、高温共に伸、絞大で鍛伸材よりすぐれているが、鍛伸比の小さいローターCは常温、高温ともに伸、絞は鍛伸材より劣っている。

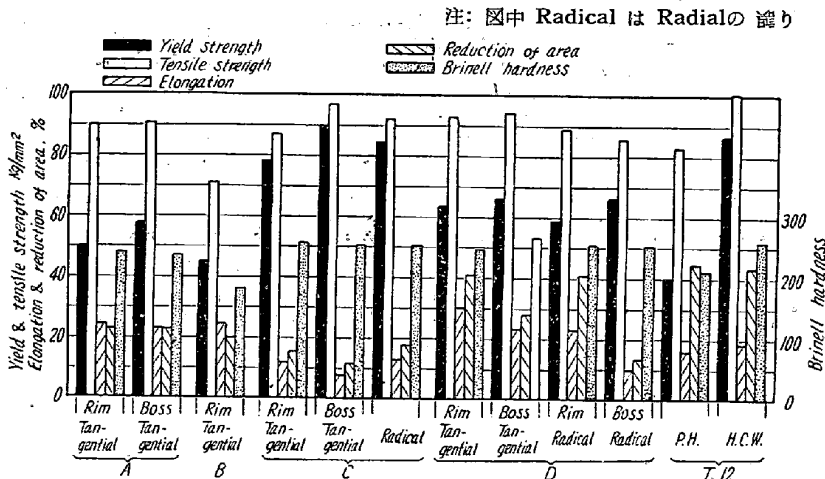


Fig. 1. Tensile properties of rotor wheels and bars.

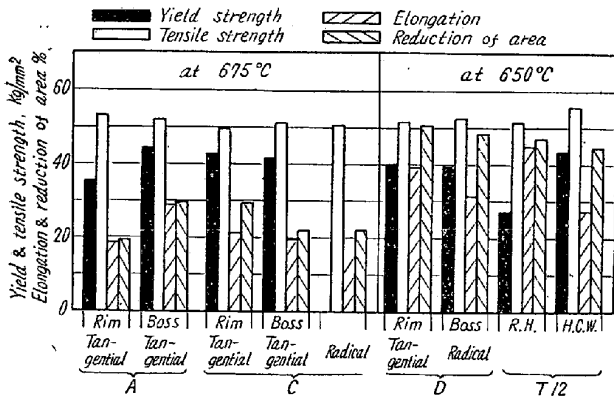


Fig. 2. Tensile properties at elevated temperature of rotor wheels and bars.

4. ローターC, Dについて同一ローター内の機械的性質を比較すると、鍛錬比の大きいローターDは比較的均一な性質で特に伸、絞の値が高いが、中心部は外周部に比し靱性は低い。これは据込鍛錬においては中心部は外周部に比し塑性流れが少ないため、半径および切線方向の引張方向はメタルフローと交叉するためであろう。

5. H.C.W. 状態のローターCはローターDに比し靱性が低いのみならず靱性のばらつきが多く、鍛錬効果の大きいローターDの機械的性質がすぐれていることは明らかである。

#### IV. クリープ破断試験結果

650°Cにおけるクリープ破断試験結果を Fig. 3 および Table 4 に示す。Table 5 はこの結果より求めた各ローターの 650°C におけるクリープ破断応力である。これらの結果より次のことが観察された。

1. Fig. 3 および Table 5 により明らかなるごとく、H.C.W. を行なつたローターC, Dのクリープ破断応力は鍛伸材よりやや低い、ほぼ近似の値を示している。また P.H. 状態のローターBは鍛伸材とほぼ同程度

のクリープ破断応力をもっている。したがって実体ローターにおいても H.C.W. 状態のものは P.H. 状態より高いクリープ破断強度を得ることは明らかである。

2. 700°C にて 6 h の時効処理を行なつたローターBと H.C.W. 状態のローターCの 650°C, 25kg/mm<sup>2</sup> におけるクリープ破断時間は H.C.W. 状態の方が僅かに破断時間が長い程度で、H.C.W. の効果はいちじるしくないが、クリープ速度は H.C.W. 状態の方がいちじるしく低く、やはり H.C.W. の効果は無視できない。

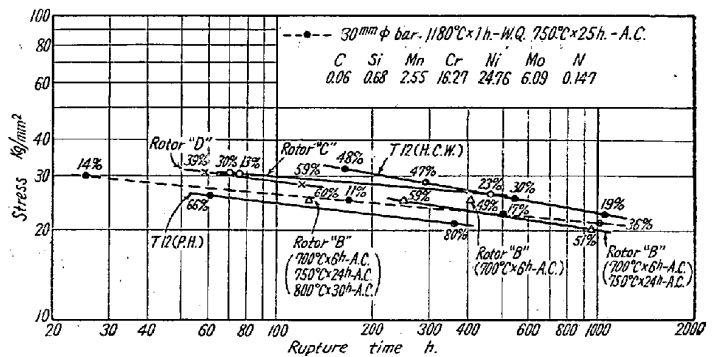


Fig. 3. Creep-rupture strength of Timken 16-25-6 rotor wheels and bars at 650°C.

3. H.C.W. 状態のローターCとDを比較すると、ローターDは鍛錬効果が大きいためCに比しクリープ靱性はきわめて大きく且比較的均一である。またローターCのクリープ靱性は局部的に低い部分が認められた。ローターDでは切線、半径方向のクリープ破断値の相違は明らかでないが、外周部と中心部を比較すれば中心部の方がクリープ靱性は減ることが認められる。

4. 短時間引張試験とクリープ破断試験結果を比較すれば、ローターC, Dの靱性の差異、外周部と中心部の靱性の差異は両試験結果は一致しているが、クリープ破断試験の方が顕著に傾向を示している。また H.C.W と P.H. の強度の差異についても両試験結果は一致した傾向を示す。

5. Fig. 4 はローターBについて時効処理のクリープ破断特性におよぼす効果を示したものである。700°C × 6h, 700°C × 6h - 750°C × 24h, 700°C × 6h - 750°C × 24h - 800°C × 30h の3種の時効処理を行なつた場合、高温長時間の時効を行えば高い硬度が得られることは当然である。然るに Fig. 4 および Table 4 で明らかなるごとく同一試験条件でクリープ破断試験を行なつた後の硬度はいずれも同一水準である。したがって高温長時間

Table 4. Result of creep-rupture test of rotor wheels at 650°C

Symbol of rotor	Location of specimens and direction of tension	Heat treatment	Testing stress kg/mm <sup>2</sup>	Time of rupture h	Elongation of rupture %	Reduction of area %	Creep rate %/h	Hardness Rockwell C	
								Before test	After test
B	Rim, Tangential	700°C×6h AC	25.0	408.0	49.3	42.9	0.025	RB 85.7	RB 96.0
	" "	700°C×6h AC	"	251.9	58.5	53.8	0.046	RB 93.3	RB 95.5
	" "	750°C×24h AC	"	"	"	"	"	"	"
	" "	700°C×6h AC	"	128.3	60.3	56.2	0.12	RB 94.1	RB 94.9
	" "	750°C×24h AC	"	"	"	"	"	"	"
C	Rim, Tangential	700°C H.C.W., 700°C×10h AC	31.5	75.0	13.2	22.2	0.016	20.5	19.4
	Boss, Tangential	" "	"	71.4	29.8	38.0	0.011	20.4	20.0
	Rim, Tangential	" "	25.0	445.5	23.3	29.0	0.008	21.7	16.2
	" "	" "	"	484.8	11.7	16.6	0.006	20.3	20.9
D	Rim, Tangential	700°C H.C.W., 650°C×10h AC	28.0	117.2	47.0	66.0	0.034		19.2
	" "	" "	"	207.9	54.5	49.8	0.024		19.2
	" Radial	" "	"	135.8	59.2	67.8	0.077		21.1
	" "	" "	"	149.7	52.2	61.3	0.053		18.7
	Boss, Tangential	" "	"	254.3	41.8	55.2	0.015		18.7
	" Radial	" "	"	324	50.2	55.3	0.017		19.0

Table 5. Creep rupture strength of rotor wheels at 650°C.

Symbol	Heat treatment	Stress (kg/mm <sup>2</sup> ) for rupture	
		100 h	1000 h
A	1200°C×4h oil quenched, 750°C×25h air cooled	—	—
B	700°C×6h air cooled, 750°C×24h air cooled	(28.8)	19.9
C	Hot cold worked at 700°C, 700°C×10h air cooled	30.2	(22.7)
D	Hot cold worked at 700°C 650°C×10h air cooled	29.3	(22.3)

Reference: ( ) Extrapolated

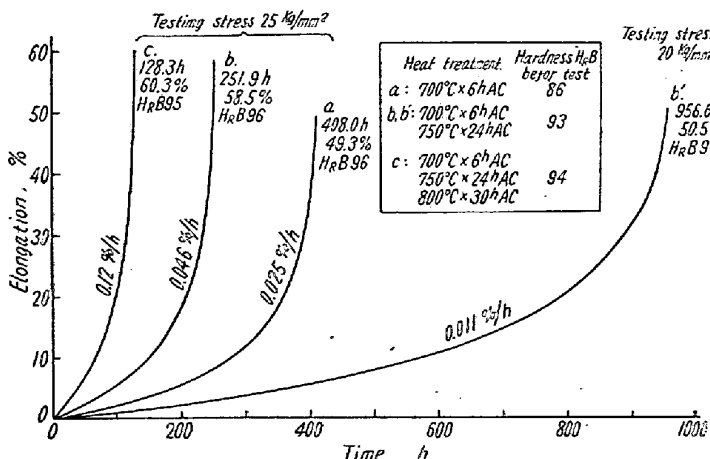


Fig. 4. Aging effect on creep curve of rotor wheel "B" at 650°C.

の時効処理を行なつて初期硬度の高い状態の試料はクリープ破断試験中にほとんど硬化していない。逆に初期硬度の低い状態の試料はクリープ破断試験中にいちじるしく硬化している。

初期に硬度が低く、クリープ破断試験中にいちじるしく硬化する熱処理状態ではクリープ破断時間は最も長く、クリープ速度は最も小でクリープ破断時の伸、絞は低くなる。すなわち既報にのべたクリープ破断試験中の析出硬化がクリープ抵抗を増加し、クリープ靱性を低下することを改めて確認できた。

6. Photo. 1~3 にローターB, C, D の顕微鏡組織を示す。ローターC, Dを比較するとCでは縞状に集合した析出物が明らかで、鍛錬効果不十分なるため不均質な組織なることは明らかで、ローターDは内、外周共に均質な組織でH.C.W.による加工歪を明らかに観察できる。ローターBは比較的均質な組織を示している。

7. 以上実体ローターについての試験結果より鍛錬効果が充分与えられたローターでは均一かつ良好な機械的性質が得られることは明らかである。

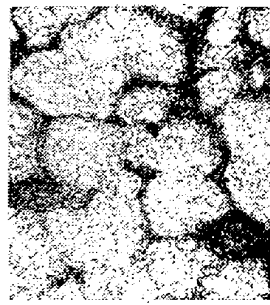
### V. 結 論

Timken材の鍛伸材と実体ローターの機械的性質を比較検討するため4個のローターの機械的性質を調査して次の結論を得た。

1. P.H. および H.C.W. 2種の熱処理の高温機



a. Outside



b. Inside  
×100(2/5)

Photo. 1. Microstructures of rotor wheel C as forged, 700°C H.C.W., 700°C×10h A.C.



Outside

×100(2/5)

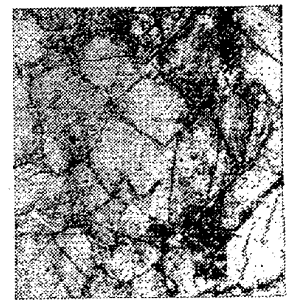
Photo. 2. Microstructure of rotor wheel B 700°C×6h-AC, 750°C×24h-AC.

機械的性質におよぼす効果は鍛伸材におけると同様で、実体ローターにおいても加工硬化処理により高温強度が高くなることが認められた。

2. H.C.W. 状態のローターのクリープ破断応力、抗張力、耐力は鍛伸材よりやや低目であるが、ほぼ同等の値がえられ、また鍛錬効果充分なる時はクリープ靱性もきわめて大となる。



a. Outside



a. Inside  
×100(2/5)

Photo. 3. Microstructures of rotor wheel "D" as forged, 700°C H.C.W., 650°C×10h-AC

3. P.H. 状態のローターの高温機械的性質は鍛伸材と同等の値がえられる。

4. 鍛錬効果不十分なローターは顕微鏡組織にて明らかに縞状の結晶偏析が認められ、特に靱性は低く、且つばらつきが多くなる。鍛錬効果充分なローターは結晶偏析は認められず、高い靱性が得られる。

5. 据込鍛錬したローターでは鍛錬効果の大きい外周部に比し中心部の切線および半径方向の靱性は引張方向がメタルフローと交叉するため多少低くなる。

文 献

- 1) 長谷川等: 「Timken 16-25-6 の高温機械的性質に関する研究-I」 「鉄と鋼」 42 (1956) p. 44~49
- 2) 長谷川等: 「Timken 16-25-6 の高温機械的性質に関する研究-II」 「鉄と鋼」 42 (1956) p. 116~120
- 3) 長谷川等: 「Timken 16-25-6 の高温機械的性質に関する研究-III」 「鉄と鋼」 42 (1956) p. 573~578
- 4) 長谷川等: 「Timken 16-25-6 の高温機械的性質に関する研究-IV」 43 (1957) p. 812~817