

大型タービン軸実体の機械的性質について*

中野 平**・山本俊二***・後藤督高**・鈴木定雄****

On the Mechanical Properties of Large Turbine Rotor Shaft.

Taira NAKANO, Shunji YAMAMOTO

Tadataka GOTO and Sadao SUZUKI

Synopsis:

To investigate the relation of the test piece positions and directions to the mechanical properties of a large sized steam turbine rotor shaft, the authors examined the impact transition temperature and the creep rupture properties of the 1Cr-1 $\frac{1}{4}$ Mo-1/4V steel high pressure turbine rotor shaft for a 125,000kW generator with varied positions of test pieces.

As to the test piece positions, the impact transition temperature rises gradually from the outer part to the center, and the creep-rupture strength at the central portion is higher than that of the outer part because of slower cooling rate; this is in good agreement with other reports. Both the elongation and the reduction of area are higher at the outer portion than those of the central.

As to the test piece directions, the impact transition temperature of the test piece of radial direction is 10° to 15°C higher than those of longitudinal and tangential direction at each position; however, these transition temperature values, even if at the central portion, satisfy mostly the A.S.T.M. standard value. The creep-rupture strength of the radial or the tangential test piece is lower than that of the longitudinal, the difference between them, however, being comparatively small, with the decrement under 10%.

Finally comparing the notched specimens with the unnotched, the former shows a higher creep rupture strength in the short time rupture test, and on the contrary a lower value in the long time rupture test, than the latter.

(Received 17 December 1962)

I. 緒 言

近年、火力発電設備はタービンの高温、高圧化とともに大型化がはかられ、その単機容量は国内では 350,000 kW 級、外国では 100,000 kW 級のものが製造されつつあり、したがって使用される材料に対してもますます高度の要求がなされている。特にカービンローター軸については高温度でしかも高速回転で使用されることから、高温度での熱安定性とともに機械的性質の均一性が要求され、特に切欠靱性とクリープ強度が重要視される。

著者らは先にタービンローター軸、発電機ローター軸に使用される各種の材質について、焼入性、焼入組織と常温、高温における機械的性質との関係などを報告^{1)~3)}し、1Cr-1 $\frac{1}{4}$ Mo-1/4V 鋼についてはクリープラプチャー性質は衝撃遷移温度とは逆にベーナイト組織の場合が最もすぐれていることを明らかにしたり。また、ほかの報告によっても同様の事実が認められており、高温度での切欠感受性は、オーステナイト化温度は低目、焼もどし

温度は高目の方が小さくなることが報告^{4)~6)}されている。しかしこれらの事実はほとんどが小試験片による結果であり、大型タービンローター軸のように非常に大きい mass を有するものでは、その位置、あるいは方向によつて機械的性質の変動することが予想されるが、これまでこれについての詳細な調査はほとんど行なわれていないようである。

本報では、最大直径約 1,100mm の1Cr-1 $\frac{1}{4}$ Mo-1/4V 鋼、高圧ローター軸を破壊して、機械的性質の中最も重要視される衝撃遷移温度とクリープラプチャー性質のローター軸内外部、およびその方向による変化について試験を行なつたので、その結果を報告する。

II. 供試ローター軸

* 昭和 37 年 10 月本会講演大会にて発表
昭和 37 年 12 月 17 日受付

** 株式会社神戸製鋼所中央研究所

*** 株式会社神戸製鋼所中央研究所, 工博

**** 株式会社神戸製鋼所高砂工場

Table 1. Chemical compositions of rotor shaft tested (%)

Steel	Charge No.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	O ₂	N ₂	H ₂ ^{**} (×10 ⁻⁴)
1Cr-1 ¹ / ₄ Mo-1 ¹ / ₄ V	T.E 2691	0.32	0.27	0.68	0.018	0.014	0.06	0.05	0.98	1.15	0.21	0.0080	0.0080	1.57
	Specification*	<0.37	0.15 ~0.35	<1.00	<0.035	<0.035	—	<0.50	0.85 ~1.25	1.00 ~1.50	0.20 ~0.30	—	—	—

* A.S.T.M. Designation. A-293-60T. Class-6. ** Sampling at ingot head after vacuum casting.

Table 2. Manufacturing process of rotor shaft tested.

Melting	60 t Acid open hearth furnace
Casting	Vacuum casting (Ingot size : 45 t)
Forging and annealing	Solid forging→Upset forging (2 cycle)→solid forging (Forging ratio : 1.54S.1/2U.1.92S.1/2U.2.04~24.43S)→Annealing
Rough machining	
Ultrasonic inspection test	
Normalizing	1100°C×15 h. Air-cooling. 1000°C×12 h Air-cooling
Quenching and Tempering	950°C×13h. Fog-quenching. 670°C×70h Furnace-cooling
Mechanical test	
Machining	Slit machining
Stress relieving	620°C×100 h Furnace-cooling
Machining	
Heat indication test	
Investigation of mechanical properties microstructure, etc.	
Quenching and tempering	954°C×12 h Fog-quenching. 670°C×70 h. Furnace-cooling
Mechanical test	

試験に供したローター軸は高圧、あるいは中圧タービンローター軸として広く用いられ A.S.T.M. 規格 A-293-60T, Class-6 に該当する 1Cr-1/4Mo-1/4V 鋼で、その化学成分を Table 1 に示す。

ローター軸は Table 2 に示すように通常行なわれている製造工程によつて製作したもので、特に熱処理は機械的性質などの比較のためにローター軸のスリット切削加工前後について行なっているが、本試験の場合はスリット切削加工後焼入、焼もどしたものである。焼入冷却速度は適切なベーナイト組織を得るために、ローター軸各部を 200~500°C/h (954~300°C 間平均値) の範囲に噴霧条件を調節した。Fig. 1 にローター軸の形状、および試験片採取位置を示す。

ローター軸の常温の機械的性質は、Table 3 に示すよ

うに強度は各部、各方向ともほぼ均一な値を有し、伸び絞り、シャルピー衝撃値は外周部から中心部にかけて低下する傾向を示すが、いずれも ASTM 規格に合致している。衝撃遷移温度、あるいはクリープラプチャー性質に密接な関係のある顕微鏡組織は、焼入冷却速度の調節によつて各部ともベーナイト組織を示しており (Photo. 1)、また JIS, G0551-1955 に準拠して測定したオーステナイト結晶粒度もかなり微細な粒度を有している (Table 4)。

III. 試験方法

ローター軸はその主要部分の衝撃遷移温度、およびクリープラプチャー試験を行なうために完全に破壊した。衝撃遷移温度は Fig. 1 に示す位置、すなわち A 部 (軸

Table 3. Mechanical properties of rotor shaft at room temperature.

Parts of rotor shaft	Testing direction	Testing* position	Tensile test				Charpy impact value (kg-m)			
			Y.S (0.02% offset) (kg/mm ²)	T.S (kg/mm ²)	E I (%)	RA (%)	U-Notch 2 mm	U-Notch 3 mm	V-Notch 2 mm	Key-hole notch 5 mm
A	Long	S	63.7	83.5	23	63	9.3	5.1	4.6	3.7
		M	64.4	83.9	21	61	6.1	4.6	3.0	2.7
		C	63.1	83.1	21	61	5.8	4.6	2.7	2.7
B	Long	S	65.9	86.6	19	51	5.3	3.4	2.2	2.3
		M	65.5	86.1	18	44	2.1	2.9	1.2	1.6
		C	65.0	85.5	19	47	3.4	2.4	1.0	0.8
	Radial	S	64.8	85.3	19	44	5.1	5.2	5.7	3.9
		M	66.3	86.4	15	33	4.8	2.7	1.1	1.8
		C	66.1	87.1	15	33	1.3	1.0	0.8	0.7
Tang	S	64.8	85.5	19	45	7.5	6.5	5.2	3.7	
	M	66.3	87.1	17	37	3.7	2.6	1.2	1.6	
	C	66.0	87.1	16	38	2.4	1.0	0.6	1.0	
C	Radial	S	62.4	83.2	19	45	4.3	—	2.4	2.4
D	Long	S	66.4	86.9	23	61	9.8	6.7	5.1	3.9
		C	67.5	87.0	22	61	6.7	6.1	2.1	3.7
Specification **			≥59.5 (≥85000 psi)	≥77.0 (≥110,000psi)	L≥16 R≥13	L≥40 R≥26	—	—	≥0.83 (≥6 ft-lb)	—

* S: Surface zone. M: Medium zone, C: Center zone

** ASTM. Designation. A-293-60T. Class-6. L: Longitudinal direction, R: Radial direction.

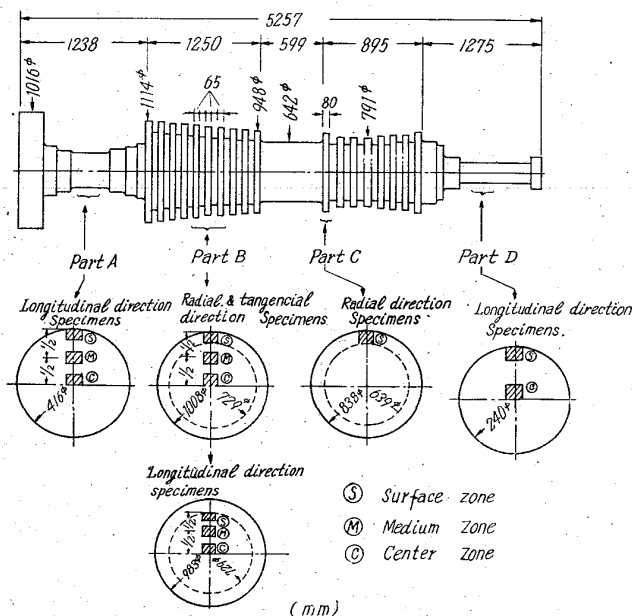


Fig. 1. Dimensions of rotor shaft and tested positions.

部) B部(中圧部) およびD部(軸部の三個所に対し外周部から中心部へかけて軸方向について、またB部に対しては半径、切線二方向についても試験を行なった。衝撃遷移温度は ASTM 規格 A-443-60T に準じ、Vノ

Table 4. Austenit grain size of rotor shaft.

Part of rotor shaft	Testing* position	Grain size (Carburized at 925°C×6h)
A	S	6.4
	C	6.2
B	S	6.5
	M	6.2
	C	5.5
D	S	7.0
	C	6.5

* S: Surface zone. M: Medium zone
C: Center zone

ッチシャルピー衝撃試験片による 50% 靱性破面率を示す温度とし、1本の遷移温度曲線には 15~20本の試験片を用い-25~150°Cの温度範囲で試験した。

クリープラプチャー試験はB部に対して外周、中間両部の軸、半径、切線の三方向について平滑、切欠両試験片により(切線方向のみ切欠試験片は行なわず)またC部に対して外周部の半径方向について平滑試験片により行なつた。試験条件はすべての場合 538°C (1000°F) 565°C (1050°F), 593°C (1100°F) の三通りの温度につい

て、試験時間を 1,000 h 程度までと一部 5,000 h 近い時間まで行ない、各試験温度に対して 3~4 本の試験片を用いた。Fig. 2 はラプチャー試験片の形状を示し、切欠試験片は切欠底直径を平滑試験片の平行部直径と等しく 6 mm とし、応力集中係数 α_K は計算値で 4.4 である。使用した試験機は 1.5 t および 3 t クリープ兼クリープラプチャー試験機、ならびに 2 t 5 本掛けマルチプルラプチャー試験機である。

IV. 試験結果ならびに考察

1) 衝撃遷移温度について

ローター軸各部の衝撃遷移温度分布を Fig. 3 に示す。焼入冷却速度によつて左右される遷移温度は、もちろん直径の最も小さい D 部から A 部、B 部の順に高く、また外周部は中心部よりも低くなつてはいるが、特に B 部、外周部の半径、切線両方向が低下しているのはローター軸をスリット切削加工状態で焼入したためである。B 部について試験した試験方向と遷移温度の関係は、半径方向が軸方向、切線方向に較べて 10~15 °C 程度高くなつてはいるが、その差異は内外部ともほぼ均一であることからローター軸の製造の適切であつたことを示している。また遷移温度は ASTM の高圧ローター軸規格に対してローター軸のほぼ中心まで満足する値を示した。

2) クリープラプチャー性質について

ローター軸 B 部について行なつたクリープラプチャー試験結果から、軸、半径、切線三方向のラプチャー強度を比較すると Log-Log 法による応力-ラプチャー時間曲線 (一例を Fig. 4, 5 に示す) においては三者の差異は小さいが軸方向が最も高く半径方向、切線方向の順に低くなつてはいる。しかし軸方向のみは試験片採取位置がほかの二方向よりも全体に軸中心の方へずれているので、Fig. 6 に示すように 1,000 h のラプチャー強度をローター軸表面からの距離に対比させると、平滑型の場合には軸方向と半径方向との差異は極くわずかであるが、切欠型ではその差異がかなり明瞭に認められることから、ラプチャー強度は軸方向、半径方向、切線方向の順に低下する傾向にあることがいえる。これらの試験方向によるラプチャー強度の低下率は最大 10% で比較的小さい値が示された。またローター軸内外部の強度変化は焼入冷却

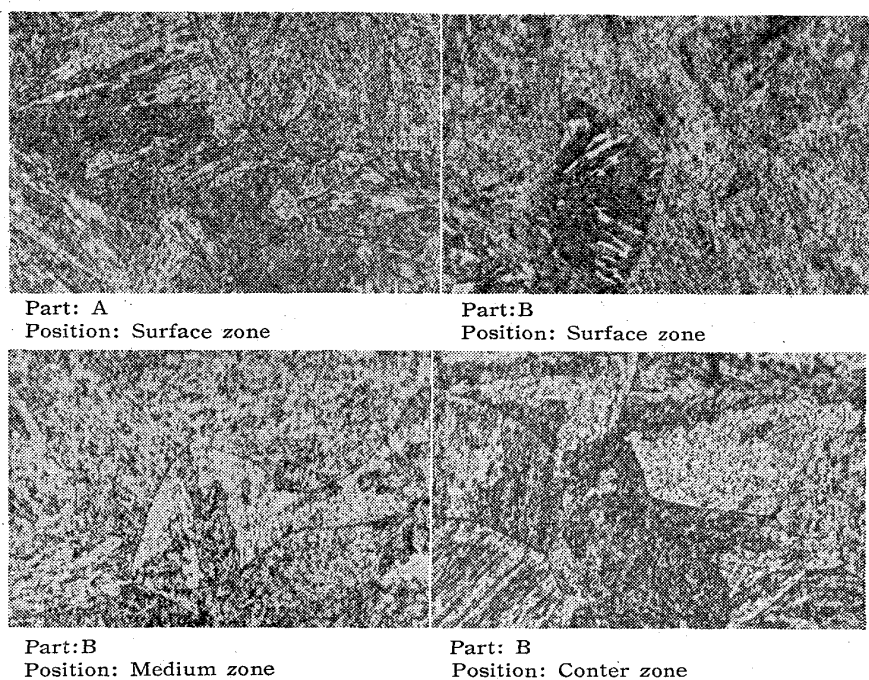


Photo. 1. Examples of microstructure. 400 (2/3)

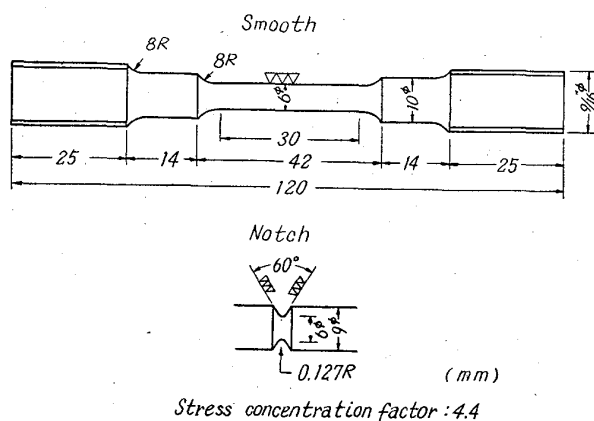


Fig. 2. Dimension of creep rupture test specimens.

速度の小さい内部の方が外周部よりも高く、これまでの小試験片による実験結果¹⁴⁾と一致した傾向を示した。このことはベーナイト組織を有する本ローター軸においても顕微鏡組織で認められたように内部の方が上部ベーナイト組織の占める率が大きいことに基因すると考えられる。他方ローター軸の長さ方向のラプチャー強度の変化は、B 部および C 部の間にほとんど差異が認められずすぐれた均一性を示した。なお、最少クリープ速度はいげれの場合もラプチャー強度と同じ変化を示し、強度の高いものはその値が小さい。

Fig. 7 は平滑型と切欠型試験片の応力-ラプチャー時間曲線を比較した一例で、切欠型は平滑型に較べてラプチャー時間の短い場合には強度は高いが、その時間の

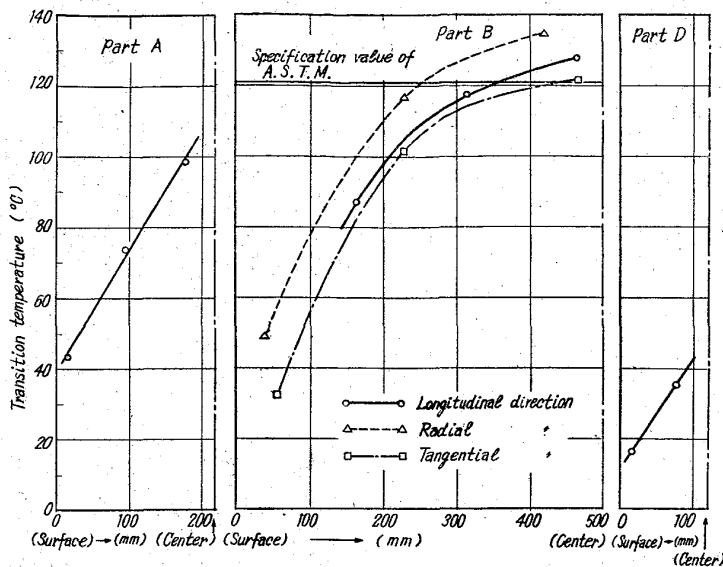


Fig. 3. Variation of impact transition temperatures of rotor shaft.

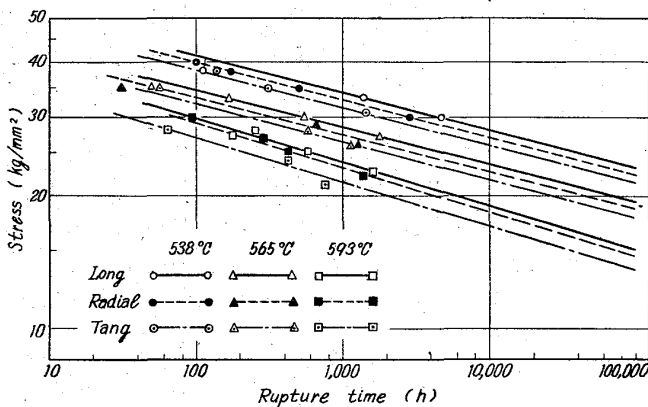


Fig. 4. Stress-creep rupture time curve (Part-B, Medium zone, smooth specimen)

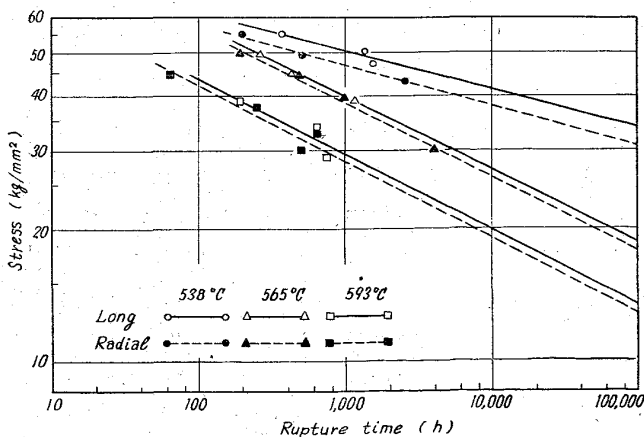


Fig. 5. Stress-creep rupture time curve (Part-B, Medium zone, Notched specimen)

長い場合の強度の低下が大きく、またその傾向は試験温度の高い程いちじるしい。したがってこの両者の10万hのラプチャー強度(外挿値)は試験温度が538°Cの場合

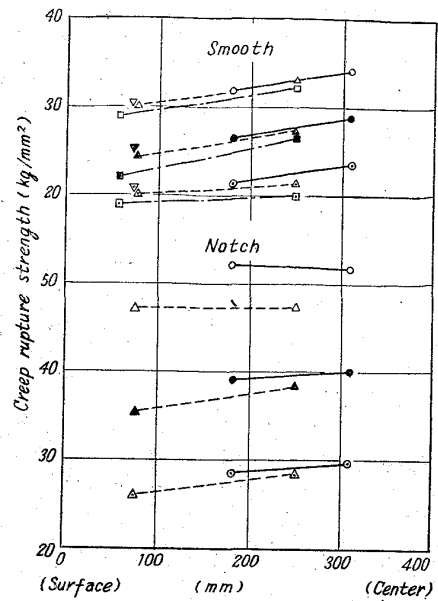


Fig. 6. Variations of creep rupture strengths of rotor shaft at 1,000 h.

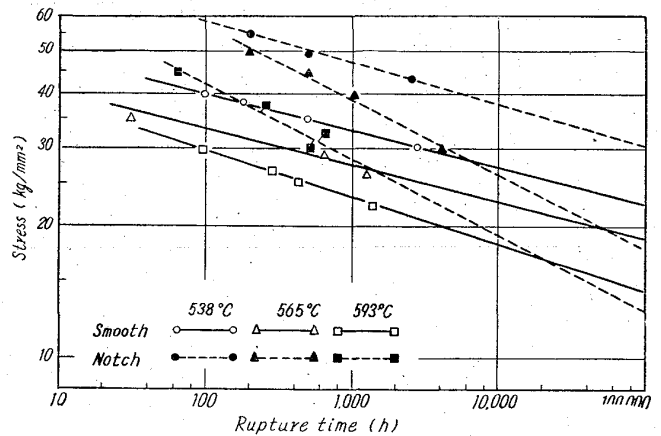


Fig. 7. Comparison of stress-creep rupture time curves between the smooth and notched specimens. (Part-B, Medium zone, Radial direction)

合には切欠型の方が高いが、593°Cの場合には逆に低くなっている。

2, 3の試験片についてラプチャー時間5,000h程度の長時間試験を行なった結果、応力-ラプチャー時間曲線において直線関係のあることを認めた。このことについてはE. F. WERNER⁴⁾らが本ローターと同一鋼種でかなり長時間の実験を行ない、切欠型試験片においてはマルテンサイト組織の場合にはラプチャー時間約2,000h以上で応力-ラプチャー時間曲線の直線性が失なわれ短

Table 5. Example of creep rupture strength at 538°C.

	T.S at room temp. (kg/mm ²)	Y.S at room temp. (kg/mm ²)	Creep rupture strength (kg/mm ²)				Stress con- centratio factor
			Smooth		Notch		
			at 100 h	at 1,000 h	at 1,000 h	at 10,000 h	
Rotor shaft tested	85.0~87.1	64.0~68.9	34.5~41.5	29.0~34.0	47.0~52.0	39.0~42.0	4.4
F. E. WERNNER ⁴⁾ data	—	72.4	41.0	31.5	42.0	28.0	4.2~4.8
J. D. CONRAD ⁶⁾ data	85.8~87.2	69.3~71.4	38.5	28.0	39.0	26.5	3.0~8.8

Note: Austenitizing temp. : 954°C.

時間で破断するが、ペーナイト組織の場合には 10,000 h 程度まで直線性を有することを確めており、本ローター軸の結果もこの事実と一致している。

Table 5 は 1Cr-1/4Mo-1/4V 鋼のクリープラプチャー強度についてこれまで報告されている中から F. E. WERNNER⁴⁾らの小型試験片による結果、および J. D. CONRAD⁶⁾らのローター軸実体についての結果との比較を行なったもので、本ローター軸のラプチャー強度は平滑、切欠両試験片ともラプチャー時間の長い場合の低下が若干少ない。また A. W. RANKIN⁷⁾らは試験温度 426~734°C の間で最大 16,422 h にわたる長時間試験によって Master-rupture-curve の範囲を示しているが、本ローター軸の値もその範囲内にあることが示された (Fig. 8)。

高温における靱性については平滑試験片のラプチャー後の伸び率を対象とすると、Fig. 9 に示すように試験方向、試験温度については明確な差異は認められないが、軸の内部は外周部に較べて全般に伸びが低く、かつラプチャー時間の長くなるにつれてその差はやや大きくなる傾向を示した。またこれらの伸び率は A. W. RANKIN⁷⁾らが示している範囲の上限あるいはやや高い値を有して

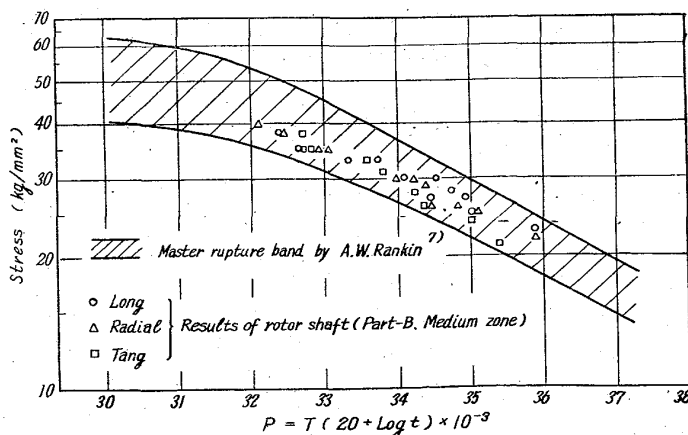


Fig. 8. Master rupture curve of rotor shaft.

いる。他方、ラプチャー後の絞り率も伸び同様、内部が外周部よりも全般に低い値を示すこと以外明確な差異を認めなかった。

V. 結 言

1Cr-1/4Mo-1/4V 鋼、大型タービンローター軸実体を破壊し、その内外部の軸、半径、切線三方向につて衝撃遷移温度、およびクリープラプチャー性質の変化を詳細に調べ、今後のローター軸製造に対する指針を得ることができた。試験結果はつぎの通りである。

1) 衝撃遷移温度は、ローター軸内外部についてはもちろん焼入冷却速度の大小によつて外周部から内部にかけて高くなつてはいるが、高圧ローター規格に対してはほぼ中心に近い位置まで満足する結果を示した。また胴部

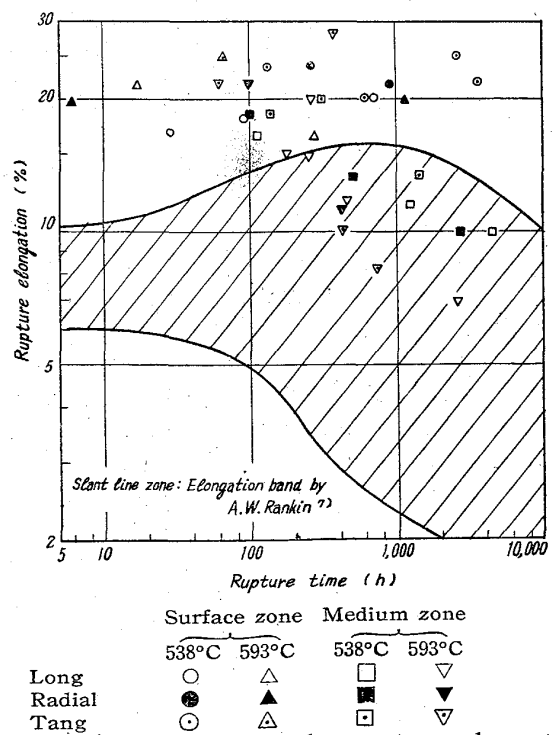


Fig. 9. Variations of the rupture elongation at various test positions.

について調べた試験方向による変化は、軸方向と切線方向との間にはほとんど差異は認められないが、半径方向は前二者よりも $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 程度高い遷移温度を示し、その差異は内外部にわたってほぼ均一である。これらの事実は本ローター軸の製造条件の適切であつたことを示唆している。

2) クリープラプチャー強度は、ローター軸内外部については焼入冷却速度の小さい内部の方が内周部より高く、このことは内部の方がベーナイト組織の中で上部ベーナイト組織の占める率の多いことに基因するものと考えられる。また試験方向については軸方向が最も高く、半径方向、切線方向の順に低下する傾向にあるが、それらの低下率は 10% 以下で比較的小さい。

3) 切欠試験片のクリープラプチャー強度は、平滑型のそれに較べて短時間側では高いが長時間側では逆に低くなる傾向を示し、それは試験温度の高い程いちじるしい。また応力-ラプチャー時間曲線は 5,000h 程度の長時間試験で直線性を有することを認めた。

4) ラプチャー後の伸び、および絞り率は、試験方向

および試験温度による変化は認められないが、ラプチャー強度とは逆に外周部の方が内部より大きく、かつラプチャー時間が長くなるに伴ないその差の大きくなる傾向を示した。これらの高温での靱性はラプチャー強度とは逆に上部ベーナイト組織よりも下部ベーナイト組織の方がすぐれていることを示すものである。

文 献

- 1) 中野, 牧岡, 新名: 鉄と鋼, 45 (1959) 3, p.360
- 2) 西原, 中野, 牧岡, 後藤: 鉄と鋼, 46 (1960) 3, p. 406
- 3) 西原, 中野, 後藤, 新名: 鉄と鋼, 46 (1960) 10 p. 1342
- 4) F. E. WERNER, T. W. EICHELBERGER, and E. K. HANN: Trans. Amer. Soc. Metals, 52 (1960) p. 376
- 5) J. D. CONRAD, and N. L. MOCHEL: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., Ang (1958), p. 1210
- 6) 渡辺, 本間: 鉄と鋼, 47 (1961) 10, p. 1475
- 7) A. W. RANKIN and B. R. SEQUIN: ASME. Paper No. 55, A-210 (1955)

9% Ni 鋼中のオーステナイトについて*

瀬川 清**・長島晋一**・関野昌蔵***・島田春夫***

Über Austenit im Stahl mit 9% Ni.

Kiyoshi SEGAWA, Shinichi NAGASHIMA

Shyōzō SEKINO and Haruo SHIMADA

Zusammenfassung:

Bekanntlich, der Stahl mit 9%Ni zeigt gute Kerbschlagzähigkeit bei sehr niedriger Temperatur unter -190°C .

Es unterliegt keinem Zweifel, daß das bei Abschrecken und Anlassen aufgetretene Austenit darüber eine große Rolle spielt.

Jedoch, der ausführliche Mechanismus löst sich bisher nicht auf. Um diesen Mechanismus aufzulösen, wurde zunächst Austenit elektrolytisch isoliert und eingehend untersucht.

Infolgedessen, wurde es festgestellt, daß Austenit durch die Verwendung des Elektrolyts, 5%Na-zitrat + 1.2%KBr + HCl (PH: 5), vollkommen isoliert werden konnte. Da dieses isolierte Austenit geringes zementit begleitete, wurde Austenit untersucht, sowohl durch die chemische

Analyse, als auch durch die magnetische Analyse. Daraus wurde es gefunden, daß Nickel im Austenit als im Grundmasse sich anreicherte. Außerdem wurde es auch vermutet, daß Mangan und Kohlenstoff im Austenit sich anreicherten. (Received 24 November 1962)

* 昭和37年10月本会講演大会にて発表 昭和37年11月受付

** 八幡製鉄株式会社八幡製鉄所技術研究所, 工博 *** 八幡製鉄株式会社八幡製鉄所技術研究所